

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Vjeran Živković

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:
Prof.dr.sc. Mladen Franz

Vjeran Živković

Zagreb, 2009.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Vjeran Živković**

Mat. br.: 0035139630

Naslov: **PRIMJENA POSREDNIČKIH ETALONA SILE PRI UMJERAVANJU
REFERENTNOG ETALONA SILE**

Opis zadatka:

Za određivanje pojedinih mehaničkih svojstava nekog materijala, poluproizvoda ili proizvoda od presudne važnosti je mjerenje sila opterećivanja koje može isti podnijeti u određenim uvjetima. Da bi postojalo povjerenje u rezultate mjerenja mora se održavati mjerna sljedivost od ispitne opreme pa sve do nacionalnog etalona. U tom lancu se nalazi i referentni etalon sile KBNM-500 kN instaliran u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Njegovo umjeravanje se provodi posredničkim etalonima sile čije je umjeravanje predhodno provedeno u njemačkom nacionalnom mjeriteljskom institutu PTB (Physikalisch – Technische Bundesanstalt). Tijekom umjeravanja pojavljuje se čitav niz utjecajnih faktora čije djelovanje je potrebno kvantitativno utvrditi i uvrstiti u proračun mjerne nesigurnosti provedenog umjeravanja. U sklopu ovog rada potrebno je provesti slijedeće:

1. Opisati općenito značenje mjerne veličine sila.
2. Navesti vrste etalonskih mjerila sile te dati njihove načine ostvarivanja opterećenja i moguće postizive mjerne nesigurnosti mjerenja.
3. Opisati referentni etalon sile KBNM-500 kN i posredničke etalone sile.
4. Opisati postupak umjeravanja etalona KBNM - 500 kN te postupak procjene i proračuna mjerne nesigurnosti istog sukladno dokumentu EURAMET Calibration Guide EM/cg/04.01/p.
5. Provesti umjeravanje referentnog etalona sile posredničkim etalonima slijedećih nazivnih vrijednosti: 50 kN; 100 kN i 500 kN u mjernom području od 10 kN do 500 kN. Na točkama preklapanja izvršiti dodatna mjerenja u cilju utvrđivanja utjecaja mjerne sposobnosti posredničkih etalona na rezultate mjerenja. Posebnu pažnju posvetiti na utvrđivanje utjecaja temperaturnih promjena i vibracija. Na temelju dobivenih rezultata mjerenja izvršiti procjenu i proračun mjernih nesigurnosti pri umjeravanju.
6. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

Zadatak zadan:

10. rujna 2009.

Rok predaje rada:

12. studenog 2009.

Predviđeni datum obrane:

18. – 20. studenog 2009.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Mladen Franz

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno uz korištenje navedene literature, znanja stečenog tokom studija, te stručnu pomoć i savjete dr.sc. Željka Alara i prof.dr.sc. Mladena Franza.

Vjeran Živković

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu teorijski i eksperimentalno obrađeno je umjeravanje referentnog etalona sile, primjenom posredničkih etalona sile.

Teorijski dio opisuje neke osnovne značajke mjerenja sile, te opisuje etalone sile kroz etalonski mjerni sustav, ukazujući na značaj održavanja mjerne sljedivosti od ispitne opreme pa sve do nacionalnog etalona. Poblje su opisani referentni etalon sile KBNM-500 kN, Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje, te posrednički etaloni sile. Nadalje su opisani postupci umjeravanja referentnog etalona sile i posredničkih etalona sile, te postupci procjene i proračuna mjernih nesigurnosti u skladu s važećim dokumentima i normama.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je umjeravanje referentnog etalona sile KBNM-500 kN, Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava. Umjeravanje je provedeno umjeravanjem triju posredničkih etalona nazivnih sila 50 kN, 100 kN i 500 kN u referentnom etalonu, sukladno normi EN ISO 376. Dobiveni rezultati mjerenja obrađeni su nakon čega su provedene usporedbe sa rezultatima umjeravanja posredničkih etalona prethodno provedenih u njemačkom nacionalnom institutu PTB (Physikalisch - Technische Bundesanstalt). Nakon toga provedena je analiza umjeravanja referentnog etalona sile, te su doneseni odgovarajući zaključci o provedenom umjeravanju.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
1. UVOD	1
2. SILA I MJERENJE SILE	2
2.1. Sila kao mjerna veličina	2
2.2. Mjerenje sile	3
2.2.1. Pogreške mjernih sustava sile	4
2.3. Mjerna nesigurnost.....	6
2.3.1. Procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja.....	7
3.2.2. Mjerna sposobnost	8
3. ETALONSKI SUSTAV MJERILA SILE	10
3.1. Sljedivost mjerenja	10
3.2. Umjeravanje	12
3.2.1. Hijerarhija umjeravanja	13
3.3. Etaloni sile.....	15
3.3.1. Podjela mjernih etalona sile.....	15
3.3.2. Načini ostvarivanja opterećenja etalona sile.....	16
3.4. Referentni etalon sile KBNM–500 kN.....	19
3.5. Posrednički etaloni sile.....	20
4. UMJERAVANJE MJERILA SILE I PROCJENA MJERNIH NESIGURNOSTI	
UMJERAVANJA	24
4.1. Umjeravanje referentnog etalona sile (FCM-a)	25

4.1.1. Procjena i proračun mjerne nesigurnosti i mjerne sposobnosti referentnog etalona.....	26
4.2. Umjeravanje posredničkih etalona sile prema normi EN ISO 376.....	29
4.2.1. Rezolucija.....	31
4.2.2. Minimalna sila.....	31
4.2.3. Postupak umjeravanja	32
4.2.4. Kriteriji za ocjenjivanje etalona	33
4.2.5. Klasifikacija posredničkih etalona	34
4.3. Određivanje mjerne nesigurnosti umjeravanja posredničkih etalona	35
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	38
5.1. Rezultati umjeravanja.....	39
5.1.1. Umjeravanje posredničkih etalona u nacionalnom etalonu sile PTB-a	39
5.1.2. Umjeravanje posredničkog etalona Z4A/50 kN u referentnom etalonu sile LIMS-a.....	42
5.1.3. Umjeravanje posredničkog etalona Z4A/100 kN u referentnom etalonu sile LIMS-a.....	46
5.1.4. Umjeravanje posredničkog etalona Z4A/500 kN u referentnom etalonu sile LIMS-a.....	49
5.1.5. Procjena mjerne sposobnosti referentnog etalona sile LIMS-a	51
5.2. Analiza rezultata umjeravanja	55
6. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA	65

POPIS SLIKA

Slika	1	-	Netočnost mjernog rezultata	4
Slika	2	-	Ponovljivost mjernog rezultata	5
Slika	3	-	Obnovljivost mjernog rezultata	5
Slika	4	-	Prikaz metoda procjene mjerne nesigurnosti	7
Slika	5	-	Piramida sljedivosti	11
Slika	6	-	Lanac mjerne sljedivosti za Hrvatsku	12
Slika	7	-	Hijerarhija umjeravanja	13
Slika	8	-	Primarni nacionalni etalon sile nazivne sile 1 MN smješten u PTB-u, Njemačka	16
Slika	9	-	Referentni etalon sile nazivne sile 100 kN smješten u PTB-u, Njemačka, s direktnim opterećenjem utezima	17
Slika	10	-	Referentni etalon sile smješten u LBF-u, Njemačka, s hidrauličnim mehanizmom opterećenja	18
Slika	11	-	Referentni etalon sile smješten u EIM-u, Grčka, s polužnim mehanizmom opterećenja	18
Slika	12	-	Referentni etalon sile KBNM-500 kN smješten u LIMS-u	19
Slika	13	-	Dvostruko složeni dinamometri referentnog etalona sile LIMS-a	20
Slika	14	-	Tipovi elastičnih elemenata	21
Slika	15	-	Tipovi DMS traka	22
Slika	16	-	Raspored DMS traka u Wheatstoneovom mostu	22
Slika	17	-	Posrednički etalon Z4A	23
Slika	18	-	Mjerno pojačalo DMP 40	23
Slika	19	-	Shema sljedivosti umjeravanja etalona i njihova mjerna nesigurnost	25
Slika	20	-	Pozicije dinamometra pri umjeravanju prema ISO 376	32
Slika	21	-	Usporedni prikaz relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/50 kN	43
Slika	22	-	Usporedni prikaz relativne pogreške obnovljivosti sa rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4A/50 kN	44
Slika	23	-	Usporedni prikaz relativne pogreške histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4A/50 kN	44
Slika	24	-	Usporedni prikaz relativne pogreške interpolacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/50 kN	44

Slika 25	- Usporedni prikaz razlika srednjih vrijednosti očitavanja u ovisnosti o sili za etalon Z4A/50 kN	45
Slika 26	- Usporedni prikaz relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/100 kN	47
Slika 27	- Usporedni prikaz relativne pogreške obnovljivosti sa rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4A/100 kN	47
Slika 28	- Usporedni prikaz relativne pogreške histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4A/100 kN	47
Slika 29	- Usporedni prikaz relativne pogreške interpolacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/100 kN	48
Slika 30	- Usporedni prikaz razlika srednjih vrijednosti očitavanja u ovisnosti o sili za etalon Z4A/100 kN	48
Slika 31	- Usporedni prikaz relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/500 kN	50
Slika 32	- Usporedni prikaz relativne pogreške obnovljivosti sa rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4A/500 kN	50
Slika 33	- Usporedni prikaz relativne pogreške histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4A/500 kN	50
Slika 34	- Usporedni prikaz relativne pogreške interpolacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/500 kN	51
Slika 35	- Usporedni prikaz razlika srednjih vrijednosti očitavanja u ovisnosti o sili za etalon Z4A/500 kN	51
Slika 36	- Usporedni prikaz relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN	55
Slika 37	- Usporedni prikaz relativne pogreške obnovljivosti sa rotacijom između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN	56
Slika 38	- Usporedni prikaz relativne pogreške histereze između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN	56
Slika 39	- Usporedni prikaz relativne pogreške interpolacije između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN	57
Slika 40	- Zajednički prikaz razlika relativnih pogrešaka između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN	57
Slika 41	- Usporedni prikaz relativnih razlika srednjih vrijednosti očitavanja bez i sa rotacijom između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN	58

Slika	42	-	Utjecaj temperature na odstupanje od srednje vrijednosti mjernog rezultata	59
Slika	43	-	Odstupanje srednjih vrijednosti očitavanja od srednje vrijednosti PTB-a	60
Slika	44	-	Razlika srednjih vrijednosti očitavanja mjerenih po danu i po noći	60
Slika	45	-	Prikaz proširene mjerne nesigurnosti referentnog etalona sile LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN	62
Slika	46	-	Lanac mjerne sljedivosti za Hrvatsku sa referentnim etalonom sile LIMS-a	63

POPIS TABLICA

Tablica	1	-	Procijenjena mjerna sposobnost referentnog etalona sile	17
Tablica	2	-	Osnovne karakteristike referentnog etalona sile LIMS-a	19
Tablica	3	-	Proširena relativna nesigurnost nacionalnog etalona	27
Tablica	4	-	Veličine pri umjeravanju normom EN ISO 376	30
Tablica	5	-	Karakteristike posredničkih etalona	35
Tablica	6	-	Rezultati umjeravanja etalona Z4A/50 kN u nacionalnom etalonu PTB-a	39
Tablica	7	-	Rezultati umjeravanja etalona Z4A/100 kN u nacionalnom etalonu PTB-a	40
Tablica	8	-	Rezultati umjeravanja etalona Z4A/500 kN u nacionalnom etalonu PTB-a	40
Tablica	9	-	Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/50 kN umjeravanog u PTB-u	40
Tablica	10	-	Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/100 kN umjeravanog u PTB-u	41
Tablica	11	-	Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/500 kN umjeravanog u PTB-u	41
Tablica	12	-	Rezultati umjeravanja etalona Z4A/50 kN u referentnom etalonu LIMS-a	42
Tablica	13	-	Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/50 kN umjeravanog u LIMS-u	43
Tablica	14	-	Rezultati umjeravanja etalona Z4A/100 kN u referentnom etalonu LIMS-a	46
Tablica	15	-	Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/100 kN umjeravanog u LIMS-u	46
Tablica	16	-	Rezultati umjeravanja etalona Z4A/500 kN u referentnom etalonu LIMS-a	49
Tablica	17	-	Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/500 kN umjeravanog u LIMS-u	49
Tablica	18	-	Procjenjene nesigurnosti umjeravanja referentnog etalona sile LIMS-a, dobivene posredničkim etalonom Z4A/50 kN	52
Tablica	19	-	Procjenjene nesigurnosti umjeravanja referentnog etalona sile LIMS-a, dobivene posredničkim etalonom Z4A/100 kN	52
Tablica	20	-	Procjenjene nesigurnosti umjeravanja referentnog etalona sile LIMS-a, dobivene posredničkim etalonom Z4A/500 kN	52
Tablica	21	-	Srednje vrijednosti očitavanja za pojedine temperature	53
Tablica	22	-	Srednje vrijednosti očitavanja mjerenja preko noći	54
Tablica	23	-	Srednje vrijednosti očitavanja mjerenja preko dana	54
Tablica	24	-	Proširene mjerne nesigurnosti referentnog etalona sile LIMS-a, dobivene umjeravanjem posredničkih etalona	61

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
a	m/s^2	Ubrzanje
a_{drift}	-	Poluširina relativne varijance drifta
a_{hys}	-	Poluširina relativne varijance histereze
a_{int}	-	Poluširina relativne varijance interpolacijskog odstupanja
a_{nul}	-	Poluširina relativne varijance nultog odstupanja
a_{obn}	-	Poluširina relativne varijance obnovljivosti
a_{pon}	-	Poluširina relativne varijance ponovljivosti
$a_{\text{rel_dev}}$	-	Poluširina relativne varijance devijacije rezultata umjeravanja
a_{rez}	-	Poluširina relativne varijance rezolucije
$b_{(1-2)}$	%	Relativna greška obnovljivosti bez rotacije
$b_{(1-3-5)}$	%	Relativna greška ponovljivosti s rotacijom
F	N	Sila
F_f	N	Nazivna sila dinamometra
F_{FSM}	N	Sila primjenjena na nacionalnom etalonu
F_N	N	Maksimalna sila umjeravanja
f_c	%	Relativno interpolacijsko odstupanje
f_0	%	Relativno odstupanje nul vrijednosti
g	m/s^2	Lokalno gravitacijsko ubrzanje
i_f	-	Očitavanje na indikatoru nakon rasterećenja
i_0	-	Očitavanje na indikatoru prije opterećenja
k	-	Faktor pokrivanja
K_{TS}	-	Koeficijent umjeravanja posredničkog etalona
m	kg	Masa
n	-	Broj rotacijskih položaja
r	N	Rezolucija indikatora
U	%	Mjerna nesigurnost
v	%	Relativna greška histereze
W_{CMC}	%	Procjenjena mjerna sposobnost referentnog etalona
$w(D)$	%	Relativna nesigurnost dugoročnog drifta
$w_{(\text{FCM})}$	%	Kombinirana standardna relativna nesigurnost realizacije sile na referentnom etalonu

$W_{(FCM)}$	%	Proširena relativna nesigurnost realizacije sile na referentnom etalonu
$w(F_{FSM})$	%	Relativna varijanca srednje vrijednosti očitavanja za pojedini korak sile nacionalnog etalona
$W_{(FSM)}$	%	Proširena relativna nesigurnost nacionalnog etalona
$w(K_{TS})$	%	Kombinirana relativna nesigurnost posredničkog etalona
$W(K_{TS})$	%	Proširena relativna nesigurnost posredničkog etalona
w_{din}	%	Sastavljena standardna nesigurnost dinamometra
W_{din}	%	Proširena mjerna nesigurnost dinamometra
w_{his}	%	Nesigurnost histereze
w_{int}	%	Nesigurnost interpolacijskog odstupanja
w_{nul}	%	Nesigurnost nultog odstupanja
w_{obn}	%	Nesigurnost obnovljivosti sa rotacijom
w_{pon}	%	Nesigurnost ponovljivosti bez rotacije
w_{ref}	%	Nesigurnost rezolucije
w_{rez}	%	Nesigurnost rezolucije
w_{RI}	%	Procijenjena dugoročna nestabilnost referentnog etalona
w_{RV}	%	Kombinirana relativna nesigurnost referentnih vrijednosti
W_{RV}	%	Proširena relativna nesigurnost referentnih vrijednosti
w_{RT}	%	Relativna nesigurnost referentnog etalona
w_{TS}	%	Sastavljena standardna nesigurnost posredničkog etalona
W_{TS}	%	Proširena mjerna nesigurnost posredničkog etalona
$w(\Delta_D)$	%	Relativna varijanca devijacije srednjih vrijednosti
$w(\Delta_H)$	%	Relativna varijanca histereze
$w(\Delta_R)$	%	Relativna varijanca ponovljivosti uz rotaciju
X	mV/V	Izmjerena vrijednost pri rastućoj sili
X_a	mV/V	Interpolirana vrijednost otklona
X''	mV/V	Izmjerena vrijednost pri padajućoj sili
X_{max}	mV/V	Maksimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5
X_{min}	mV/V	Minimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5
X_N	mV/V	Otklon koji odgovara maksimalnoj sili umjeravanja
X_{sr}	mV/V	Srednja vrijednost više očitavanja
$X_{sr(1-2)}$	mV/V	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri istom položaju
$X_{sr(1-3-5)}$	mV/V	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri različitom položaju
ρ	kg/m ³	Gustoća

1. UVOD

Budući da je sila jedna od važnijih fizikalnih veličina, vrlo je nužno njeno poznavanje te ispravno i što kvalitetnije mjerenje, koje je osnova za određivanje mehaničkih svojstava nekog materijala ili proizvoda, kao i za konstrukciju, izvedbu, primjenu i sigurnost raznih uređaja. Time se zahtjevi s obzirom na preciznost i točnost uređaja za mjerenje sile svakim danom povećavaju.

Jedan od najbitnijih čimbenika na kvalitetu mjerenja sile je oprema za mjerenje. Za različite sustave potrebne su i različite točnosti mjerila sile. Kako bi mjerenja bila pouzdana i točna, potrebno je koristiti pravilne mjerne tehnike, kao i odgovarajuće mjerne uređaje. Mjerila sile tijekom uporabe gube na preciznosti usljed različitih oštećenja, kvarova pojedinih sklopova, neadekvatne uporabe, istrošenja pojedinih sklopova, itd., te ih je radi toga potrebno umjeravati kako bi pružala zadovoljavajuću kvalitetu i točnost mjerenja. Umjeravanje mora biti provedeno preciznijom i točnijom umjernom opremom nego što je sami uređaj za mjerenje sile, što znači da mjerilo sile mora biti uspoređeno s mjerilom na višoj mjeriteljskoj razini.

U ovome radu biti će objašnjena važnost i načini mjerenja sile te oni elementi mjeriteljstva koji osiguravaju pouzdanost i točnost mjerenja. Biti će pojašnjeni bitniji termini u mjeriteljstvu, a najviše će biti riječi o sljedivosti mjerenja sile, etalonskom mjernom sustavu i samim etalonima, te umjeravanju mjerila sile. Detaljnije će biti razrađen postupak umjeravanja referentnog etalona sile, te procjene mjerne nesigurnosti istog.

U eksperimentalnom dijelu rada provest će se umjeravanje posredničkih etalona sile sa dinamometrom tipa Z4A, nazivnih sila 50 kN, 100 kN i 500 kN, u referentnom etalonu sile Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS-a). Ti etaloni su prethodno umjereni u nacionalnom etalonu sile Njemačke, u institutu Physikalische - Technische Bundesanstalt (PTB). Dobiveni rezultati biti će obrađeni prema odgovarajućim uputama i normama, nakon čega će biti uspoređeni i analizirani, te će na temelju njih biti doneseni određeni zaključci o mjernoj sposobnosti referentnog etalona LIMS-a.

2. SILA I MJERENJE SILA

2.1. Sila kao mjerna veličina

Sila je jedan od najelementarnijih pojmova u fizici. To je vektorska veličina (određena je pravcem, smjerom i iznosom) kojom se opisuje međudjelovanje tijela i njegove okoline i kojom se objašnjavaju uzroci gibanja. Oznaka za silu je F . Sila je kao fizikalna veličina definirana kao mjera interakcije među tijelima [1].

Prema SI sustavu mjerna jedinica za silu je 1 Newton [N]. To je ona sila koja masi od 1 kg daje ubrzanje od 1 m/s^2 [1]. U praksi je teško postići ubrzanje od 1 m/s^2 djelujući na tijelo mase 1 kg u svrhu realizacije sile od 1 N, tako da se sila ostvaruje podvrgavanjem tijela mase m lokalnom zemljinom gravitacijskom ubrzanju g , čime djeluje na potporu postignutom silom ($F = m \times g$). Na ovakav način ostvaruje se sila u uređajima koji su direktno opterećivani utezima [1].

Osnovna podjela sila:

- Kontaktne - kako im i samo ime govori, rezultat su fizičkog kontakta dvaju tijela. Postoji više vrsta kontaktnih sila – aktivne, reaktivne, vanjske, unutarnje.
- Volumenske (masene) - vezane su uz postojanje polja sile u nekom prostoru. One ne djeluju neposredno na neki dio tijela, a na ostale dijelove posredno, već istovremeno djeluju na sve čestice tijela, tj. prožimaju ga u njegovom cijelom volumenu. U ovu vrstu sila spadaju elektromagnetske, gravitacijska, inercijalne sile.

Silu i njezino djelovanje opisuju Newtonovi zakoni, koji su tri osnovna zakona klasične mehanike:

- 1. Newtonov zakon: Svako tijelo (i materijalna točka) ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog gibanja po pravcu dok vanjska sila ne uzrokuje promjenu tog stanja. Zovemo ga još zakonom inercije.
- 2. Newtonov zakon: Ubrzanje je proporcionalno sili što djeluje na tijelo, a zbiva se u smjeru djelovanja sile ($F = m \times a$)
- 3. Newtonov zakon: Sila je međudjelovanje dvaju tijela, i zato se uvijek javlja u paru: prvo tijelo djeluje silom na drugo i drugo tijelo djeluje silom na prvo. Te dvije sile istog su iznosa i suprotnog smjera.

U znanosti o materijalima, djelovanje sile na tijelo proučava se prije svega zbog promatranja ponašanja materijala tijela, a pomoću toga određuju se brojna mehanička svojstva pojedinih materijala, koja su prije svega vezana uz promjenu oblika materijala, tj. ispitnog tijela. Sile kojima se djeluje na materijale mogu imati različite iznose te mogu djelovati na različite načine na materijal, s obzirom da je sila vektorska veličina. Prema tome razlikuju se različita opterećenja – vlak, tlak, smik, savijanje, uvijanje, zatim statičko i dinamičko opterećenje, kratkotrajno i dugotrajno opterećenje itd.

2.2. Mjerenje sile

Mjerenje sile predstavlja osnovu za određivanje mehaničkih svojstava nekog materijala ili proizvoda. Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, jer se na osnovu njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja [2]. Samo ispitivanje sile provodi se na uređajima za mjerenje sile a najčešće su to kitalice različitih tipova i oblika. Tijekom uporabe ti uređaji s vremenom gube na preciznosti, zbog čega se kroz jedno umjerno razdoblje provodi periodična kontrola i umjeravanje uređaja za mjerenje sile, kako bi mjerenja bila pouzdana i točna, što je važno sa stanovišta sigurnosti raznih strojnih dijelova.

Sila je matematički predstavljena kao vektor koji djeluje u određenoj točki. Stoga mjerenje sile uključuje određivanje njene veličine i smjera djelovanja. Mjerenje sile može se provesti jednom od ove dvije metode [2]:

- **Direktna:** obuhvaća izravnu usporedbu s poznatom gravitacijskom silom utega standardne mase. Vrijednosti mase i gravitacije moraju biti točno poznate.
- **Indirektna:** obuhvaća mjerenje učinka sile na neko tijelo. Primjeri primjene ove metode su:
 - mjerenje akceleracije tijela s poznatom masom koje je izloženo djelovanju sile,
 - mjerenje resultantnog učinka (deformacije) kada se silom djeluje na elastične elemente.

Metoda s elastičnim elementima ima veću primjenu, a razlozi za veću primjenu su:

- a) veliki raspon mjerenja,
- b) mogućnosti kontinuiranog praćenja vrijednosti sile,
- c) jednostavnija uporaba,
- d) njihova otpornost.

Da bi mjerenja bila pouzdana i točna, potrebno je koristiti odgovarajuće mjerne metode i uređaje, koji su pravilno umjereni, te se pridržavati propisanih zahtjeva. Uređaji za mjerenje sile razlikuju se prema metodi mjerenja, konstrukciji, načinu ostvarivanja opterećenja i namjeni. Mjerni uređaji prema namjeni mogu biti:

- ispitni uređaji - oprema za mjerenje sile: kidalice i preše,
- etalonski uređaji - oprema za umjeravanje: nacionalni, referentni i prijenosni etaloni sile.

Ispitni uređaji koriste se u različitim industrijskim granama, a prisutni su u gotovo svim fazama nastanka nekog proizvoda: istraživanju i razvoju, procesu proizvodnje, montaži, ispitivanju i testiranju proizvoda i strojeva, kontroli kvalitete. Etaloni se koriste isključivo za umjeravanje, kako ispitnih uređaja, tako i drugih etalona niže mjeriteljske razine.

2.2.1. Pogreške mjernih sustava sile

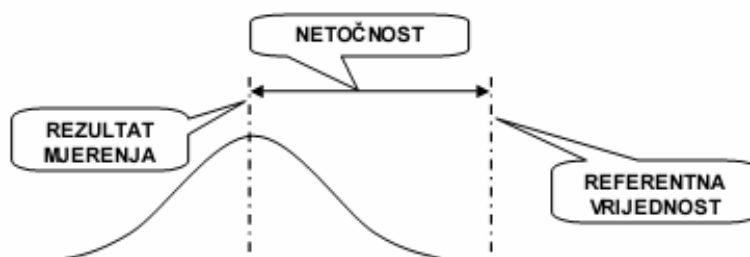
Općenito, iskazivanjem mjernog rezultata (vrijednost dobivena mjerenjem) nekog mjernog sustava treba jasno naznačiti odnosi li se na:

- neispravljeni rezultat,
- ispravljeni rezultat,
- prosjek više vrijednosti.

Potpuna mjeriteljska informacija (iskazivanje rezultata mjerenja) uključuje i podatke o mjernoj nesigurnosti.

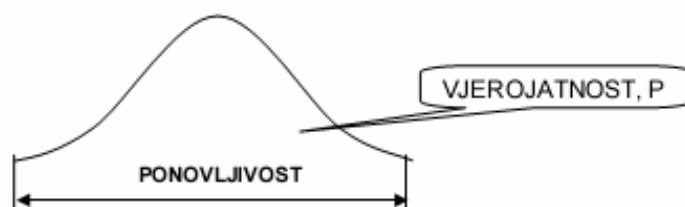
Pri procjeni i analizi mjernog sustava treba imati na umu neke od osnovnih karakteristika svakog mjernog sustava [1], [3]:

- **Netočnost** - razlika između dobivenog rezultata mjerenja i referentne vrijednosti.
Referentna vrijednost je vrijednost koja služi kao dogovorena referenca za mjernu vrijednost, a može biti utvrđena na osnovi srednje vrijednosti rezultata više mjerenja provedenih mjernom opremom više razine točnosti.



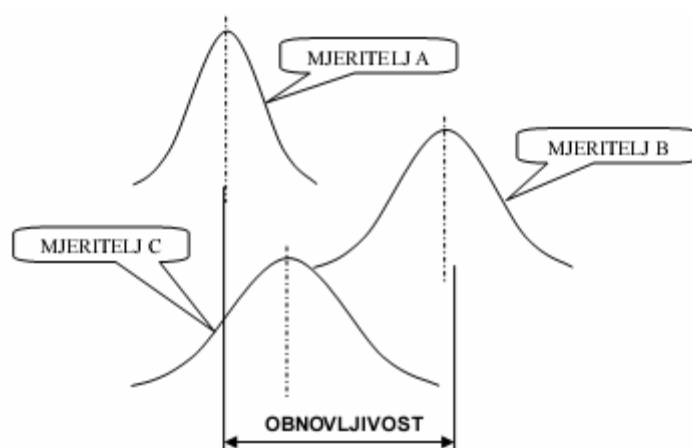
Slika 1 – Netočnost mjernog rezultata [3]

- **Linearna pogreška** - stalan (linearni) rast ili pad vrijednosti pogreške rezultata mjerenja (netočnosti) unutar određenog dijela mjernog područja instrumenta.
- **Nestabilnost** - totalna varijacija mjerenja jedne karakteristike tijekom dužeg vremenskog razdoblja.
- **Ponovljivost** - usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u istim mjernim uvjetima koji uključuju:
 - isti mjerni postupak,
 - istog mjeritelja,
 - isto mjerilo upotrebljavano u istim uvjetima,
 - isto mjerno mjesto,
 - ponavljanje u kratkom vremenu.



Slika 2 – Ponovljivost mjernog rezultata [3]

- **Obnovljivost** - rasipanje rezultata mjerenja dobiveno uz promjenu nekog mjernog uvjeta, npr. dobiveno od strane većeg broja mjeritelja pri višestrukom mjerenju iste karakteristike na istim dijelovima uz korištenje istog ili različitog mjernog instrumenta.



Slika 3 – Obnovljivost mjernog rezultata [3]

- **Histereza** – razlika očitavanja rastućeg i padajućeg mjernog niza kod iste narinute sile.
- **Drift** – slabljenje mjeriteljskih značajki mjernog sustava.

2.3. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost definirana je kao parametar pridružen rezultatu nekog mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjernoj veličini [4].

Mjerna nesigurnost je ustvari sumnja u rezultat mjerenja i ona pokazuje koliko je izmjerena vrijednost blizu stvarnoj vrijednosti mjerene veličine [5].

Mjerna nesigurnost ovisi o uvjetima koji vladaju u nekom laboratoriju, stanju i kvaliteti mjerne opreme, računalnoj programskoj podršci, matematičkim zakonitostima, vremenskim intervalima umjeravanja i još brojnim drugim čimbenicima.

Mjerenja nisu savršena kako zbog djelovanja slučajnih utjecaja (trenutna promjena temperature, tlaka i vlage ili neiskustvo mjeritelja, nesavršenost uređaja i osjetila) tako i zbog ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja (promjena karakteristike instrumenta između dva umjeravanja, utjecaj mjeritelja pri očitavanju analogne skale, nesigurnost vrijednosti referentnog etalona itd.). Mjerna nesigurnost je upravo posljedica djelovanja slučajnih utjecaja i ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja [3].

Pri procjeni i proračunavanju potrebno je odrediti slijedeće veličine vezane uz mjernu nesigurnost [5]:

- **Mjerna nesigurnost** - (općenito) je parametar povezan s rezultatom mjerenja, koji pokazuje rasipanje vrijednosti koje bi se mogle razumno pripisati mjerenoj veličini.
- **Standardna mjerna nesigurnost** - nesigurnost mjerenja izražena kao standardna devijacija mjerene veličine te ima istu mjernu jedinicu kao mjerena veličina.
- **Relativna standardna mjerna nesigurnost** - jednaka je omjeru standardne nesigurnosti i procjenjene vrijednosti mjerene veličine te je bezdimenzijska.
- **Proširena mjerna nesigurnost** - prošireni interval vrijednosti koje se mogu pripisati mjerenoj veličini uz određenu vjerojatnost, a dobiva se kao umnožak standardne nesigurnosti i faktora pokrivanja. U slučaju normalne raspodjele rezultata mjerenja uzima se da je faktor pokrivanja jednak 2, čime je osigurana vjerojatnost od 95 %.

Pojave koje doprinose mjernoj nesigurnosti i prema tomu činjenici da se mjerni rezultat ne može opisati jednom vrijednošću nazivaju se izvorima nesigurnosti. Budući da su potpuno točna mjerenja neostvariva cilj je mjerenja da izmjerena vrijednost bude što bliža stvarnoj vrijednosti. U praksi postoje mnogi mogući izvori mjerne nesigurnosti. Najčešći od tih izvora su [2], [5]:

- nepotpuno određenje mjerene veličine,
- nesavršeno ostvarenje određenja mjerene veličine,

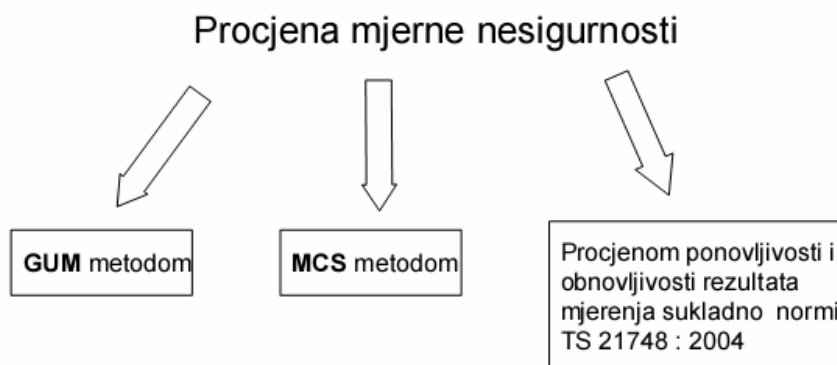
- nesavršenost uzorkovanja (mjereni uzorak može ne prikazivati definiranu mjerenu vrijednost),
- neodgovarajuće poznavanje djelovanja okolnih uvjeta na mjerni postupak ili nesavršeno mjerenje okolnih uvjeta,
- osobna pristranost motritelja (očitanje analognog mjerila),
- razlučivanje mjerila ili prag pokretljivosti,
- vrijednosti pridružene mjernom etalonu,
- vrijednosti konstanti i drugih parametara dobivene iz vanjskih izvora koje se upotrebljavaju u algoritmima za obradbu podataka,
- aproksimacije i pretpostavke ugrađene u mjernu metodu i mjerni postupak,
- promjene ponovljenih opažanja mjerene veličine pod očigledno istovjetnim uvjetima.

Niti jedan rezultat mjerenja nije potpuno siguran (točan) tj. uvijek sadrži veću ili manju pogrešku što upućuje na potrebu iskazivanja mjerne nesigurnosti.

Pri mjerenjima teži se postizanju što manje mjerne nesigurnosti. Što je manja mjerna nesigurnost to je povjerenje u mjerni rezultat veće. Minimalna vrijednost mjerne nesigurnosti predstavlja mjernu sposobnost nekog laboratorija za mjerenja koja provodi.

2.3.1. Procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja

Pri mjerenjima teži se postizanju što manje mjerne nesigurnosti. Što je manja mjerna nesigurnost to je povjerenje u rezultat mjerenja veće. Minimalna vrijednost mjerne nesigurnosti predstavlja najbolju mjernu sposobnost nekog laboratorija za mjerenja koja provodi. Slika 4 prikazuje podjelu metoda za procjenu mjerne nesigurnosti .



Slika 4 – Prikaz metoda procjene mjerne nesigurnosti [3]

GUM metodom procjenjuju se dvije vrste nesigurnosti: standardna nesigurnost A vrste odnosno B vrste [3].

- Procjena nesigurnosti A vrste - temelji se na odgovarajućim statističkim metodama (npr. izračunavanjem standardnog odstupanja srednje vrijednosti mjernog niza).
- Procjena nesigurnosti B vrste - temelji se na znanstvenom sudu donesenom na osnovu raspoloživih podataka (iskustveni podaci, podaci iz priručnika, podaci prijašnjih mjerenja itd.)
- Ukupna mjerna nesigurnost iskazuje se izrazom:

$$u_C = \sqrt{u_A + u_B} \quad [\%] \quad (3.1.)$$

- Određivanje proširene mjerne nesigurnosti - veličina koja određuje interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća veliki dio razdiobe vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini. Ukoliko se ukupna mjerna nesigurnost pomnoži sa faktorom prekrivanja k , dolazi se do proširene mjerne nesigurnosti:

$$U = k \times u_C \quad [\%] \quad (3.2.)$$

MCS metoda služi za vrednovanje i usporedbu rezultata dobivenih GUM metodom. Također i ova metoda zahtjeva dobru statističku podlogu i dobro poznavanje sustava, njegovih karakteristika, kao i potrebno mjerno iskustvo i znanje.

Kao osnova za procjenu mjerne nesigurnosti kod treće metode koriste se mjere rasipanja: ponovljivost i obnovljivost rezultata mjerenja. Te mjere su procijenjena standardna odstupanja dobivena iz analize eksperimentalnih podataka.

3.2.2. Mjerna sposobnost

Mjerna sposobnost jedan je od parametara koji se upotrebljavaju za određivanje opsega djelovanja kojeg ovlaštenog laboratorija. Danas se ona označava kao **CMC** (**C**alibration **M**easurement **C**apability)

Mjerna sposobnost (uvijek se odnosi na kakvu posebnu veličinu odnosno mjerenu veličinu) definira se kao najmanja mjerna nesigurnost koju kakav laboratorij može postići u okviru svog ovlaštenja kad provodi više ili manje svakodnevna umjeravanja gotovo idealnih mjernih etalona čija je svrha definirati, ostvarivati, čuvati ili obnavljati jedinicu te veličine ili jednu ili više njezinih vrijednosti ili kad provodi više ili manje svakodnevna umjeravanja gotovo idealnih mjerila oblikovanih za mjerenje te veličine [5].

Mjerna sposobnost mora se iskazivati na istoj razini koja se zahtijeva za potvrde o umjeravanju, tj. u obliku povećane nesigurnosti obično s faktorom pokrivanja $k = 2$. Samo u

onim iznimnim slučajevima gdje se ne može pretpostaviti da se mjerni rezultati pokoravaju normalnoj razdiobi ili se ocjena temelji na ograničenim podacima, mjerna se sposobnost treba iskazivati s vjerojatnošću pokrivanja od približno 95% [2].

3. ETALONSKI SUSTAV MJERILA SILE

3.1. Sljedivost mjerenja

Sljedivost znači postupak pri kojemu se pokazivanje kojeg mjerila (ili koje tvarne mjere) može uspoređivati u jednoj ili više faza s nacionalnim etalonom dotične mjerene veličine [6].

Sljedivost se može definirati kao: „svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referentnim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedbi koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti“ [7]. Sljedivost rezultata prema nacionalnim i međunarodnim etalonima znači da su umjeravanja provedena korištenjem opreme koja je umjerena nekim "točnijim" mjerilom, koje je pak umjereno još "točnijim" etalonom. Time se ostvaruje neprekinuti lanac usporedbi sve do nacionalnog etalona čime se postiže globalna povezanost rezultata mjerenja, kako bi se oni mogli međusobno uspoređivati i kako bi rezultati različitih laboratorija bili jednako mjerodavni.

Sljedivost mjerne i ispitne opreme prema nacionalnim etalonima na temelju umjeravanja sve se više zahtijeva zbog rastućih nacionalnih i međunarodnih zahtjeva da proizvedeni dijelovi budu zamjenjivi; tvrtke proizvođača koje izrađuju proizvode i kupaca koji ih ugrađuju s drugim dijelovima moraju mjeriti "istom mjerom" [6].

Sljedivost se opisuje nizom bitnih elemenata [6]:

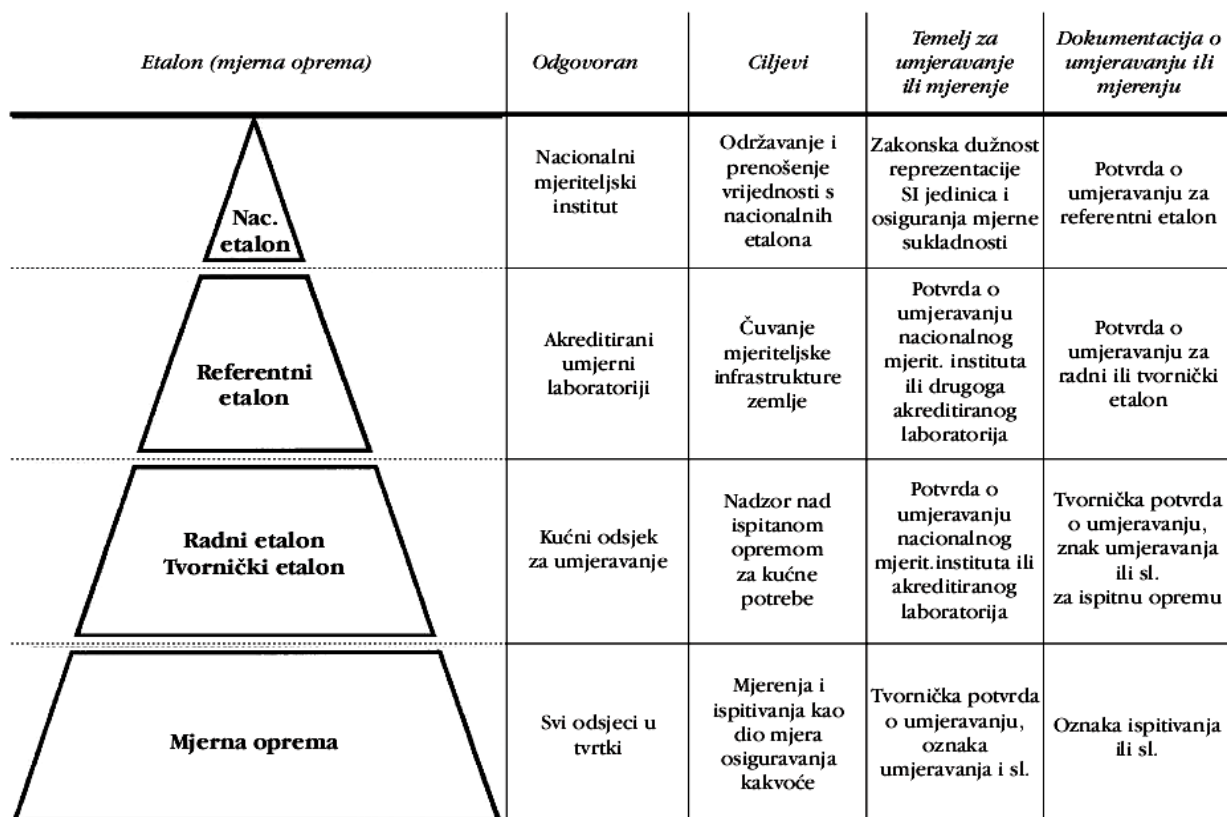
- (a) neprekinut lanac usporedaba koje vode prema etalonu koji je prihvatljiv stranama, obično nacionalnomu ili međunarodnomu etalonu;
- (b) mjerna nesigurnost; mjerna nesigurnost za svaki korak u lancu sljedivosti mora se izračunati u skladu s dogovorenim metodama te se mora navoditi tako da se može izračunati sveukupna nesigurnost za cijeli lanac;
- (c) dokumentacija; svaki korak u lancu mora se provoditi u skladu s dokumentiranim i općenito prihvaćenim postupcima; rezultati se moraju dokumentirati na isti način;
- (d) mjerodavnost; laboratoriji ili tijela koja provode jedan ili više koraka u lancu moraju pružiti dokaze o svojoj tehničkoj mjerodavnosti, npr. dokazom da su akreditirani;
- (e) upućivanje na SI jedinice; lanac usporedaba mora završavati primarnim etalonima za ostvarenje SI sustava jedinica;

(f) ponovna umjeravanja; umjeravanja se moraju ponavljati u odgovarajućim vremenskim odsječcima; duljina tih odsječaka ovisit će o nizu varijabla, npr. zahtijevanoj nesigurnosti, čestoći uporabe, načinu uporabe i stabilnosti opreme.

Ovisno o tome o kakvim se mjerilima ili etalonima radi, te na kojem su oni položaju u lancu usporedbi, sljedivost je moguće ostvariti na više načina [8]:

- preko umjernog laboratorija same tvrtke,
- preko ovlaštenog laboratorija,
- preko državne mjeriteljske ustanove,
- do međunarodnog etalona,
- do definicijskog etalona.

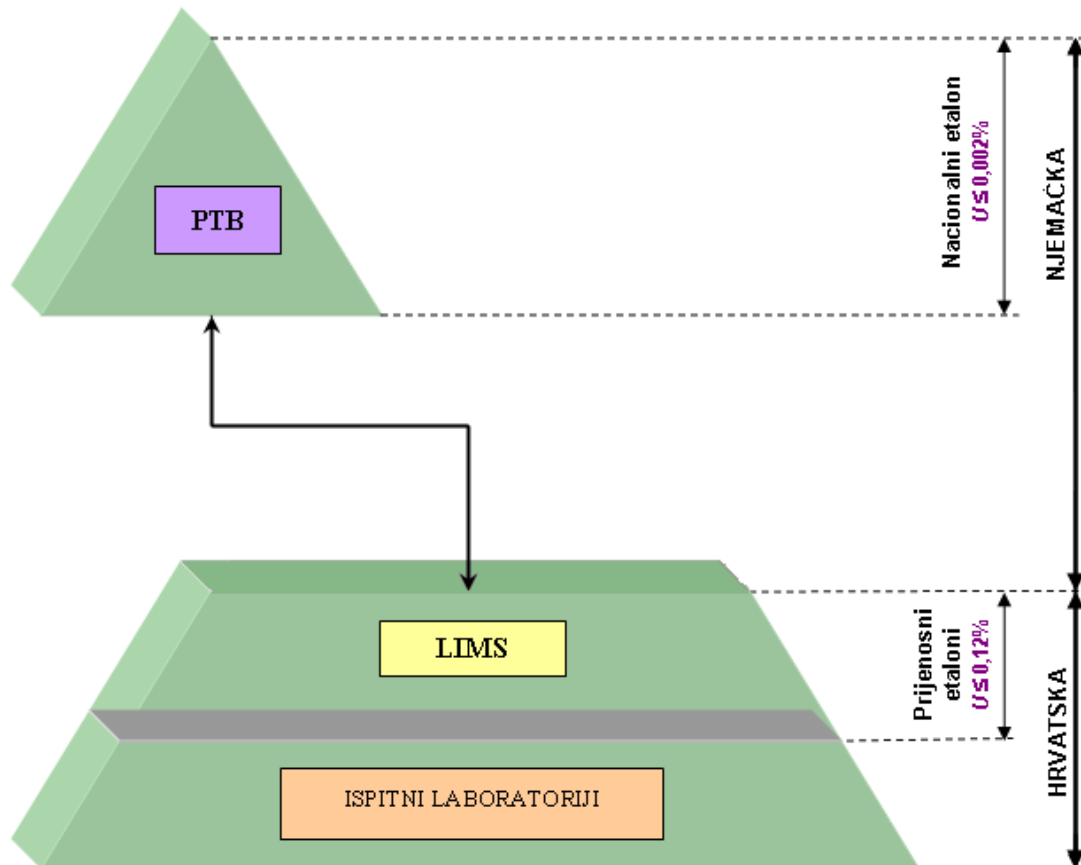
Osiguranje sljedivosti postiže se prvenstveno umjeravanjem i verifikacijom mjerne i ispitne opreme u laboratorijima koji mogu pokazati svoju sljedivost i osposobljenost. Osiguravanjem sljedivosti osigurava se kvaliteta mjerenja s maksimalnom pouzdanošću i s najmanjom mjernom nesigurnošću. Neprekinuti lanac usporedbi koji osigurava sljedivost, počevši od najniže razine na kojoj su mjerila i ispitna oprema, kao što su kitalice, pa sve do nacionalnog etalona koji ima najvišu mjeriteljsku kakvoću, hijerarhijski prikazuje lanac mjerne sljedivosti tj. piramida sljedivosti prikazana na slici 5.



Slika 5 – Piramida sljedivosti [6]

Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstva (LIMS) je nositelj državnog etalona za silu u mjernom području 50 N – 200 kN s mjernom sposobnošću $<0,12\%$.

Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje održava sljedivost državnih etalona umjeravanjem vlastitih etalona u međunarodnim ustanovama kao što je Laboratorij za silu u Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), Njemačka. Na slici 6 prikazan je lanac mjerne sljedivosti etalona sile u Hrvatskoj, s pripadnim mjernim nesigurnostima.



Slika 6 – Lanac mjerne sljedivosti za Hrvatsku [9]

3.2. Umjeravanje

Umjeravanje znači određivanje i dokumentiranje odstupanja pokazivanja mjerila (ili utvrđene vrijednosti stvarne mjere) od dogovorene “istinite” vrijednosti mjerene veličine [6].

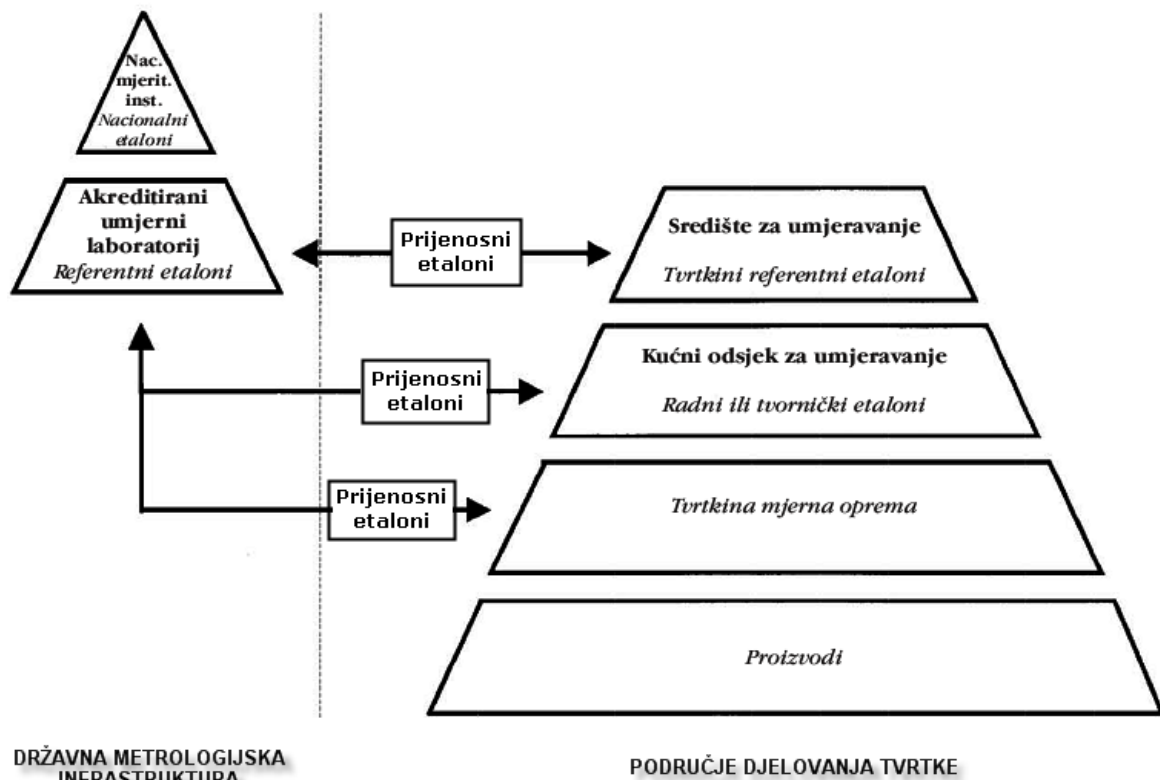
To je skup postupaka kojim se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka stvarna mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima [3].

Tri su glavna razloga za umjeravanje mjerila [8]:

1. da se osigura da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima,
2. da se odredi točnost očitavanja mjerila,
3. da se utvrdi pouzdanost mjerila , tj. može li mu se vjerovati.

3.2.1. Hijerarhija umjeravanja

Umjeravanje se provodi uporabom etalona čija je mjeriteljska kakvoća već određena umjeravanjem etalomom više razine. Postoji prema tomu **hijerarhija umjeravanja** kako je prikazano na slici 7, koja pokazuje kako kućni sustav umjeravanja (desna strana dijagrama) može uzajamno djelovati s postojećom mjeriteljskom infrastrukturom (lijeva strana dijagrama).



Slika 7 - Hijerarhija umjeravanja [6]

Međunarodna razina

Na međunarodnoj razini odluke koje se odnose na Međunarodni sustav jedinica (SI) i ostvarenje primarnih etalona donosi Opća konferencija za utege i mjere (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM). Međunarodni ured za utege i mjere (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) zadužen je za usklađivanje razvoja i čuvanje primarnih etalona te organizaciju njihova uspoređivanja na najvišoj razini.

Nacionalni mjeriteljski instituti

Nacionalni mjeriteljski instituti najviši su autoriteti u mjeriteljstvu u gotovo svim zemljama. U većini slučajeva oni čuvaju "nacionalne etalone" dotične zemlje koji su izvori sljedivosti za odgovarajuću fizikalnu veličinu u toj zemlji.

Ako nacionalni mjeriteljski institut ima sredstva za ostvarivanje odgovarajuće mjerne SI jedinice (naziv SI jedinice uključuje sve izvedene jedinice), nacionalni etalon istovjetan je ili izravno sljeditiv prema primarnom etalonu koji ostvaruje tu jedinicu. Ako institut nema ta sredstva, mora osigurati sljedivost mjerenja prema primarnom etalonu koji se čuva u drugoj zemlji. Nacionalni mjeriteljski instituti osiguravaju međunarodnu usporedivost primarnih etalona. Odgovorni su za prenošenje mjernih jedinica prema korisnicima, bili oni znanstvenici, javne vlasti, laboratoriji ili industrijska poduzeća. Oni su na taj način najviša razina hijerarhije umjeravanja u kojoj zemlji. Zapadnoeuropski nacionalni mjeriteljski instituti surađuju u EURAMET-u.

Akreditirani umjerni laboratoriji

Akreditirani laboratoriji često su na najvišoj razini unutrašnje hijerarhije umjeravanja kakve tvrtke. Njihov je zadatak da u odgovarajućim vremenskim odsječcima uspoređuju vlastite radne etalone tvrtke (tvorničke etalone) s referentnim etalonima koje je umjerio nacionalni mjeriteljski institut ili koji akreditirani laboratorij koji ima odgovarajuću mjernu sposobnost.

Kućno umjeravanje (tvorničko umjeravanje)

Kućni sustav umjeravanja osigurava redovito umjeravanje sve mjerne i ispitne opreme koja se upotrebljava u tvrtki prema njezinim vlastitim referentnim etalonima. Referentni etaloni tvrtke moraju imati mjernu sljedivost time što su umjereni u kojemu akreditiranom laboratoriju ili nacionalnome mjeriteljskom institutu. Kućno umjeravanje može se dokazati tvorničkom potvrdom o umjeravanju, naljepnicom o umjeravanju ili nekom drugom prikladnom metodom. Podatci o umjeravanju moraju se čuvati tijekom predviđena razdoblja.

3.3. Etaloni sile

Po definiciji etalon je ostvarenje definicije dane veličine, s iskazanom vrijednošću veličine i mjernom nesigurnošću, koja se upotrebljava kao referencija [10].

Mjerni etalon često se upotrebljava kao referencija za utvrđivanje vrijednosti veličina i pridruženu mjernu nesigurnost za dodojelu mjernih rezultata druge veličine iste vrste, uspostavljajući tako mjeriteljsku sljedivost umjeravanjem drugih mjernih etalona, mjerila ili mjernih sustava [10].

3.3.1. Podjela mjernih etalona sile

- **Primarni etalon** – etalon koji je izabran ili za koji je opće prihvaćeno da ima najveću mjeriteljsku kakvoću, a čija se vrijednost potvrđuje bez upućivanja na druge etalone iste veličine.
- **Sekundarni etalon** – etalon koji ima svoju vrijednost veličine dodijeljenu usporedbom s primarnim etalom iste veličine.
- **Međunarodni etalon** – etalon priznat dogovorom da bi služio kao međunarodna osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima određene veličine.
- **Državni etalon** – etalon priznat odlukom koje države da bi služio u toj državi kao osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima određene veličine.
- **Referentni etalon** - etalon koji općenito ima najveću mjeriteljsku kakvoću na danom mjestu ili u danoj organizaciji iz kojeg se izvode mjerenja koja se tu provode.
- **Posrednički etalon** – etalon koji se upotrebljava kao posrednik za usporedbu etalona.
- **Prijenosni etalon** - etalon, katkad posebne konstrukcije, namijenjen za prijenos na različita mjesta.
- **Radni etalon** – etalon koji se redovito upotrebljava za umjeravanje ili provjeru tvarnih mjera, mjerila ili referentnih tvari [6], [10].

Radni etaloni mogu također biti istodobno referentni etaloni. To je posebno slučaj za radne etalone koji se izravno umjeravaju prema etalonima nacionalnih mjeriteljskih instituta. Isto tako posrednički etaloni često su istodobno i prienosni etaloni. Svaki etalon mora imati svoje mjesto u piramidi sljedivosti te se mora direktnim lancem usporedbi povezati sa primarnim etalom.

3.3.2. Načini ostvarivanja opterećenja etalona sile

U hijerarhijskom lancu etalona za silu nema primarnog etalona na međunarodnoj razini, nego mjesto na najvišoj mjeriteljskoj razini zauzimaju **primarni nacionalni etaloni za silu** (Force Standard Machines – FSM). Jedan takav nacionalni etalon sile Njemačke prikazan je na slici 8.



Slika 8 – Primarni nacionalni etalon sile nazivne sile 1 MN smješten u PTB-u, Njemačka [11]

Kod primarnih nacionalnih etalona sila se ostvaruje direktno, isključivo preko utega, a ne polugama i sličnim elementima. Pri tome je masa utega određena preko referentnih etalona mase, a gravitacija je izvedena veličina koja se može izmjeriti s nesigurnošću reda 10^{-6} . Relativna nesigurnost mjerenja, s kojom vrijednost sile može biti realizirana utezima kao mehanizmom ostvarenja sile i utemeljena u različitim nacionalnim laboratorijima, kod primarnih nacionalnih etalona manja je ili jednaka 2×10^{-5} [2].

Sila koja se ostvaruje utegom određene mase na zraku izračunava se pomoću jednadžbe [12]:

$$F = m \cdot g \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \quad [\text{N}] \quad (3.3.)$$

gdje je:

m – masa utega [kg]

g – akceleracija slobodnog pada [m/s^2]

ρ_a – gustoća zraka [kg/m^3]

ρ_m – gustoća utega [kg/m^3]

Referentni etaloni sile (Force Calibration Machines – FCM), koji su na sljedećoj razini u mjerenju sile, mogu realizirati silu na više načina, a o načinu njihovog ostvarivanja opterećenja ovisit će i mjerna sposobnost referentnih etalona sile, koja predstavlja njihove moguće postizive mjerne nesigurnosti mjerenja. U tablici 1 prikazane su vrijednosti mjernih sposobnosti za različite načine ostvarivanja opterećenja referentnih etalona.

Tablica 1 – Procijenjena mjerna sposobnost referentnog etalona sile [12]

Tipovi referentnih etalona prema mehanizmu opterećivanja	Procijenjena mjerna sposobnost (proširena relativna mjerna nesigurnost)
Mehanizam opterećivanja direktno utezima	5×10^{-5} do 1×10^{-4}
Hidraulični mehanizam opterećivanja	1×10^{-4} do 5×10^{-4}
Polužni mehanizam opterećivanja	1×10^{-4} do 5×10^{-4}
Komparatorni sustav	do 5×10^{-3}

Mjerne nesigurnosti uređaja s opterećivanjem direktno utezima mogu se računati na sličan način kao i za nacionalni etalon i mogle bi biti i manje od 5×10^{-5} . Međutim, ako se traži da budu sljedivi prema nacionalnom etalonu, postizanje mjerne sposobnosti manje od 5×10^{-5} moglo bi biti ili tehnički vrlo teško izvedivo ili jednostavno preskupo. Za referentne etalone tog tipa opterećenja kao najmanja moguća nesigurnost uzima se 5×10^{-5} . U većini slučajeva zadovoljavajuća mjerna sposobnost nekog umjernog laboratorija iznosi 1×10^{-4} . To omogućuje umjernim laboratorijima umjeravanje opreme na najbolje klase specificirane standardom ISO-376 [13]. Primjere referentnih etalona s različitim načinima ostvarivanja opterećenja prikazuju slike 9, 10, i 11.



Slika 9 – Referentni etalon sile nazivne sile 100 kN smješten u PTB-u, Njemačka, s direktnim opterećenjem utezima [14]



Slika 10 – Referentni etalon sile smješten u LBF-u, Njemačka, s hidrauličnim mehanizmom opterećenja [14]



Slika 11 – Referentni etalon sile smješten u EIM-u, Grčka, s polužnim mehanizmom opterećenja [14]

3.4. Referentni etalon sile KBNM–500 kN

U Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje smješten je referentni etalon sile KBNM-500 kN, proizvođača GTM (**G**assmann **T**esting and **M**etrology), Njemačka, prikazan na slici 12. Mjerno područje referentnog etalona LIMS-a je 10 kN – 500 kN, a nazivna sila mu iznosi 500 kN.



Slika 12 – Referentni etalon sile KBNM-500 kN smješten u LIMS-u

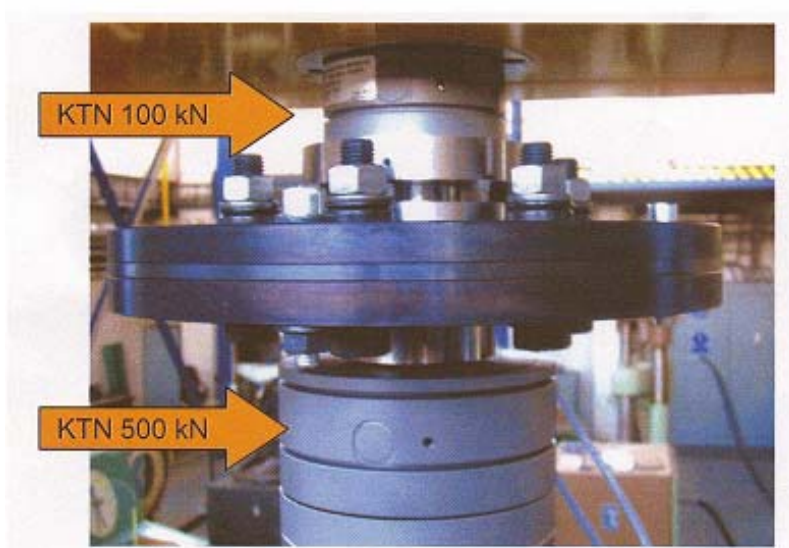
Tablicom 2 prikazane su neke od osnovnih karakteristika referentnog etalona sile LIMS-a.

Tablica 2 – Osnovne karakteristike referentnog etalona sile LIMS-a [15]

KARAKTERISTIKE REFERENTNOG ETALONA SILE	
Proizvođač	GTM, Njemačka
Mjerno područje	10 – 500 kN
Nazivna sila	500 kN
Način opterećenja	hidraulički
Smjer opterećenja	Vlak, tlak
Ponovljivost	1×10^{-04}
Procijenjena mjerna sposobnost	< 0,05 %
Mjerni sustav	Komparatorni s dvostrukim dinamometrima

Instalacijom referentnog etalona sile čija pretpostavljena mjerna sposobnost iznosi $< 0,05\%$ LIMS je krenuo u postupak akreditacije za umjeravanje prijenosnih etalona sile sukladno normi ISO EN 376 a samim time i u proces poboljšanja mjerne sposobnosti [15].

Referentni etalon LIMS-a ima komparatorni mjerni sustav s dvostruko složenim dinamometrima, koji predstavljaju deformacijsko tijelo čija se deformacija pod djelovanjem sile pretvara u izlazni električni signal koji ide u mjerno pojačalo. Takav mjerni sustav omogućuje referentnom etalonu sile LIMS-a postizanje mjerne sposobnosti manje od $0,05\%$, te široko mjerno područje. Dvostruko složeni dinamometri su visokoprecizni dinamometri tipa KTN-100 kN i KTN-500 kN nazivnih sila 100 kN i 500 kN. Svaki se koristi u mjernom području od 10% do 100% nazivne sile, te je time moguće ostvariti mjerno područje od 10 kN do 500 kN. Dinamometri su prikazani slikom 13.



Slika 13 – Dvostruko složeni dinamometri referentnog etalona sile LIMS-a [16]

Uređaj je smješten u odgovarajućim okolišnim uvjetima, u zatvorenoj prostoriji, koja posjeduje mogućnost stalne kontrole i regulacije temperature, kao i praćenje promjene vlage i tlaka zraka. Uređaj je postavljen na antivibracijskim temeljima kako bi se spriječio utjecaj okolišne buke i vibracija na rezultate mjerenja.

3.5. Posrednički etaloni sile

Posrednički etaloni većinom pripadaju mjerilima sile s elastičnim elementom. Sastoje se od četiri osnovne komponente:

- dinamometra određenog razreda sile (deformacijsko tijelo),
- mjernog pojačala,

- uređaja za očitavanje,
- kabela kojima je ostvarena fizička veza između komponenti.

Pri tome uređaj za očitavanje i mjerno pojačalo najčešće čine jedan sklop.

Dinamometri se mogu razlikovati prema smjeru opterećenja i prema vrsti deformacije.

Moguća opterećenja su:

- vlak,
- tlak,
- univerzalno (vlak i tlak).

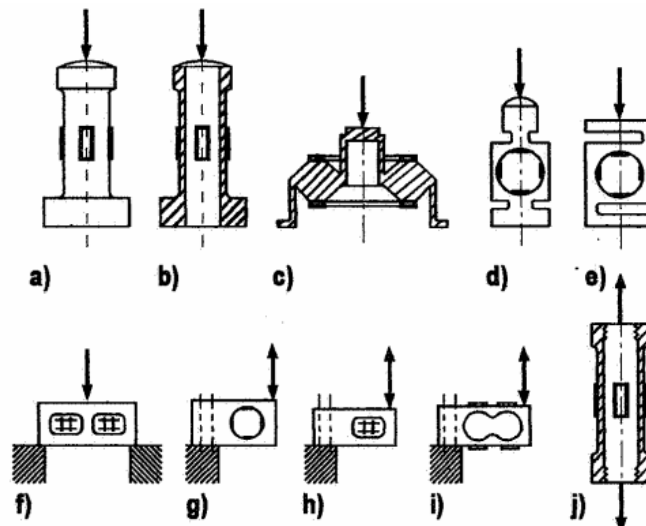
Deformacija može biti:

- promjena duljine,
- promjena volumena,
- električna ili magnetna promjena

Dinamometar se sastoji od tri osnovna elementa: kućišta, elastičnog elementa i elemenata s određenim električnim otporom, npr. DMS mjerne trake pričvršćene na elastični element.

Osnovne funkcije kućišta su:

- omogućiti montažu dinamometra u drugi uređaj,
- omogućiti pravilan prijenos sile,
- štititi unutarnje elemente od vanjskih utjecaja,
- onemogućiti ometanje mjerenja nepoželjnim silama.



Slika 14 – Tipovi elastičnih elemenata [1]

- a) tlačni cilindar - 50 kN do 50 MN
- b) tlačni cilindar (šuplji) - 10 kN do 50 MN
- c) toroidalni prsten - 1 kN do 5 MN

- f) dvostrani smični nosač - 20 kN do 2 MN
- g) savojni nosač – 500 N do 50 kN
- h) smični nosač – 1 kN do 500 kN

d) prsten - 1 kN do 1 MN

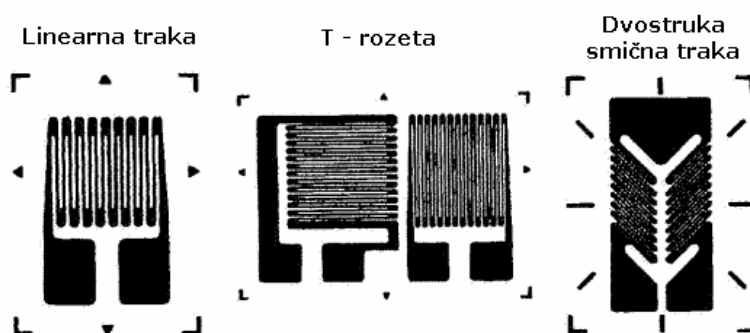
i) savojni nosač - 100 N do 10 kN

e) S-nosač (savijanje ili smik) – 200 N do 2 MN

j) vlačni cilindar - 50 kN

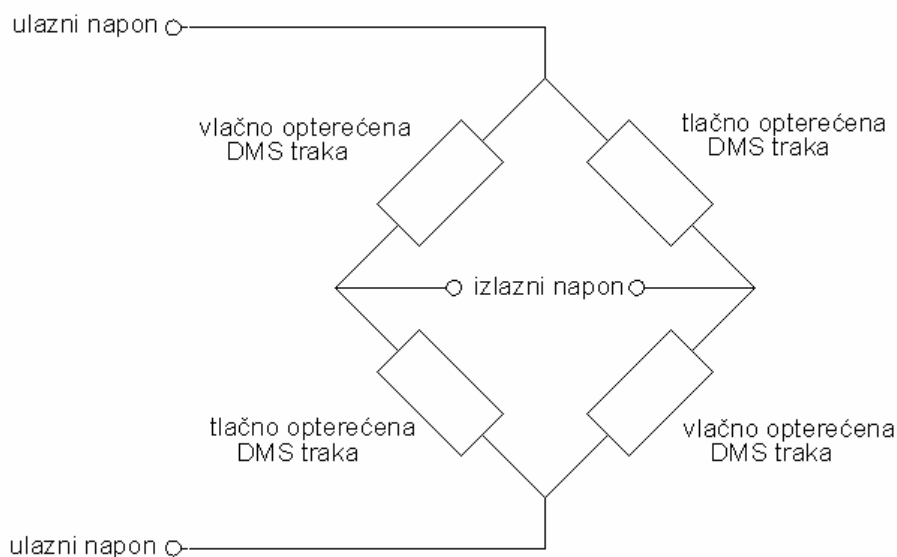
Princip mjerenja sile posredničkim etalonom je sljedeći:

Kada određena sila djeluje na dinamometar, tj. na deformacijsko tijelo, on će se produljivati ili skraćivati, ovisno o smjeru sile. Zajedno s njim deformirat će se i DMS trake. DMS trake su zavojnice od metalne folije ili trake koje imaju neki električni otpor koji ovisi o njihovim dimenzijama. Uslijed širenja ili stezanja traka, mijenja se i njihov otpor. Danas su DMS trake najraširenije u mjernim sustavima, jer se njima postiže veća točnost mjernih rezultata, lakše se ostvaruje samo mjerenje, itd. Slika 15 prikazuje neke tipove DMS traka.



Slika 15 – Tipovi DMS traka [1]

DMS trake povezuju se u Wheatstoneov most (slika 16). Tako se iz promjene otpora traka dobiva promjena napona u mostu koju je lakše bilježiti i očitavati. Ona se iskazuje u jedinici mV/V. Promjena otpora proporcionalna je promjeni sile, a promjena napona je proporcionalna promjeni otpora pa je automatski i napon proporcionalan sa silom.



Slika 16 – Raspored DMS traka u Wheatstoneovom mostu [1]

U ovome radu za umjeravanje referentnog etalona sile LIMS-a korišteni su posrednički etaloni s dinamometrima tipa Z4A, nazivnih sila 50 kN, 100 kN, i 500 kN, proizvođača HBM GmbH (Hottinger Baldwin Messtechnik), Njemačka. Posrednički etalon tog tipa prikazuje slika 17.



Slika 17 – Posrednički etalon Z4A [17]

Mjerno pojačalo korišteno u ovom radu je DMP 40, također proizvođača HBM GmbH, Njemačka. Mjerno pojačalo DMP 40 prikazano je na slici 18.



Slika 18 – Mjerno pojačalo DMP 40 [17]

4. UMJERAVANJE MJERILA SILE I PROCJENA MJERNIH NESIGURNOSTI UMJERAVANJA

Umjeravanje mjerila i etalona sile nužno je, da se osigura odgovarajuća preciznost mjerila i traženi stupanj nesigurnosti, kako bi korisnik imao povjerenje u rezultat mjerenja. Redovitim umjeravanjem etalona i mjerila osigurava se sljedivost.

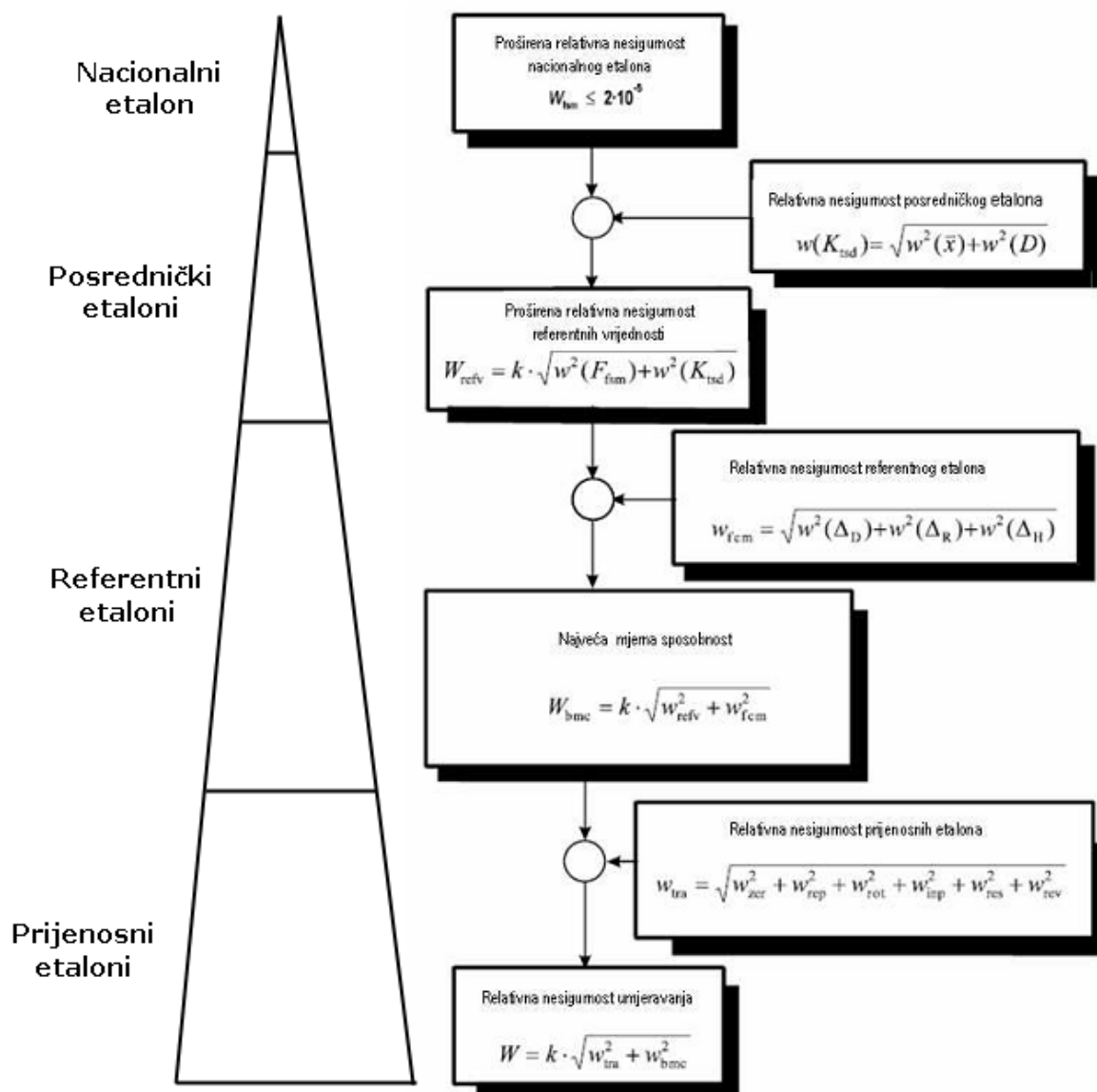
Upravo su postupci umjeravanja ono što dovodi neko mjerilo ili etalon niže razine u direktnu vezu s primarnim etalom.

Mjerila i etaloni sile mogu se umjeravati sljedećim metodama [8]:

- standardnim utezima,
- izbalansiranim polugama i standardnim utezima,
- elastičnim uređajima,
- kontrolnim epruvetama.

Najviše primjenjivana metoda za umjeravanje je elastičnim uređajima, dok se umjeravanje standardnim utezima te polugama i utezima koristi za umjeravanje mjerne opreme npr. kidalica, a kontrolne epruvete koriste se kod međulaboratorijskih usporedbi rezultata mjerenja sile, ali ne i za umjeravanje.

Na slici 19 prikazan je položaj mjernih etalona u shemi sljedivosti umjeravanja etalona, te njihove mjerne nesigurnosti.



Slika 19 – Shema sljedivosti umjeravanja etalona i njihova mjerna nesigurnost [13]

4.1. Umjeravanje referentnog etalona sile (FCM-a)

Kako bi se dobili podatci za određivanje mjerne nesigurnosti referentnog etalona kao prvo treba zadovoljiti **plan umjeravanja referentnog etalona** koji se sastoji od pet osnovnih koraka [12]:

- Odabir nekoliko posredničkih etalona – treba odabrati više posredničkih etalona kako bi se pokrio cijeli raspon sila koje podržava referentni etalon sile. Kako bi se smanjio utjecaj interakcija, raspon radnih sila posredničkog etalona uobičajeno iznosi između 40% do 100% njegove nazivne sile, jer pri tim rasponima posrednički etaloni pokazuju najmanje pogreške. To najčešće zahtijeva tri do pet posredničkih etalona

sile kako bi se pokrio cijeli raspon referentnog etalona, koji uglavnom pripadaju najvišoj klasi takvih uređaja. Ponekad je potrebno imati različite posredničke etalone ukoliko se umjeravanje vrši i na vlak i na tlak.

- Umjeravanje posredničkih etalona sile u nacionalnom etalonu sile (FSM). Time se dobivaju referentne vrijednosti za umjeravanje. Postupak mjerenja se provodi u skladu s normom EN ISO 376 za umjeravanje posredničkih etalona sile. Mjerenja se trebaju izvršiti u barem tri različita rotacijska položaja, s ponovljenim mjerenjem u barem jednom rotacijskom položaju, te trebaju uključivati histereza mjerenja. Time se dobivaju podaci prema kojima se može vidjeti značaj histereze prilikom umjeravanja i utjecaj rotacije etalona.
- Umjeravanje referentnog etalona pomoću posredničkih etalona – postupak mjerenja je identičan kao i postupak umjeravanja posredničkih etalona u nacionalnom etalonu.
- Usporedba dobivenih rezultata mjerenja – za svaki korak sile uzimaju se srednje vrijednosti dobivenih očitavanja te se određuju relativne devijacije između referentnih vrijednosti umjeravanja dobivenih na nacionalnom etalonu i vrijednosti umjeravanja referentnog etalona. Također, uspoređuju se i utjecaji rotacije i histereze prilikom umjeravanja. Iz dobivenih veličina dalje se računa relativna mjerna nesigurnost umjeravanog referentnog etalona te je moguće izračunati i sposobnost mjerenja i umjeravanja akreditacijskog laboratorija.
- ponovno umjeravanje posredničkih etalona u nacionalnom etalonu.

4.1.1. Procjena i proračun mjerne nesigurnosti i mjerne sposobnosti referentnog etalona

Sukladno dokumentu EURAMET Calibration Guide EM/cg/04.01/p, te prema preporukama dokumenta EAL-G22 – Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements, procjena relativne i proširene relativne mjerne nesigurnosti i procjena mjerne sposobnosti provodi se u sljedećih pet koraka [12], [13]:

- Određivanje mjerne nesigurnosti realizacije sile na nacionalnom etalonu.
- Određivanje mjerne nesigurnosti umjeravanja posredničkih etalona u nacionalnom etalonu.
- Određivanje mjerne nesigurnosti referentnih vrijednosti posredničkih etalona.
- Određivanje mjerne nesigurnosti realizacije sile na referentnom etalonu sile.
- Određivanje mjerne sposobnosti referentnog etalona sile.

1. Određivanje mjerne nesigurnosti realizacije sile na nacionalnom etalonu

Proširena relativna nesigurnost nacionalnog etalona $W_{(FSM)}$ ovisi najviše o tipu samog uređaja. Za uređaje s utezima ona je uobičajeno najmanja, dok je za hidraulične i polužne uređaje nešto veća. Najčešće vrijednosti prikazane su u tablici 3.

Tablica 3 – Proširena relativna nesigurnost nacionalnog etalona [13]

Način opterećenja	s utezima	polužni	hidraulični
$W_{(FSM)}$	2×10^{-5}	1×10^{-4}	2×10^{-4}

2. Određivanje mjerne nesigurnosti umjeravanja posredničkih etalona u nacionalnom etalonu

Pri umjeravanju posredničkih etalona u nacionalnom etalonu, određuje se njihov koeficijent umjeravanja K_{TS} koji je jednak omjeru primjenjene sile F_{FSM} i očitavanja na pojačalu posredničkog etalona X :

$$K_{TS} = \frac{F_{FSM}}{X} \quad (4.1.)$$

Kako bi se uklonio utjecaj rotacije na rezultate umjeravanja, vrijednost X je ustvari srednja vrijednost od n izmjerenih vrijednosti za istu silu u različitim rotacijskim položajima:

$$X_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4.2.)$$

gdje X_i predstavlja očitavanja na pojačalu posredničkog etalona u različitim rotacijskim položajima.

Relativna varijanca srednje vrijednosti očitavanja za pojedini korak sile iznosi:

$$w^2(X) = \frac{1}{n(n-1)} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{(X_i - X)}{X} \right)^2 \quad (4.3.)$$

Pri tome se pretpostavljaju jednake varijance očitavanja u različitim rotacijskim položajima.

Kombinirana relativna nesigurnost vrijednosti sila očitanih na posredničkom etalonu $w(K_{TS})$ računa se prema izrazu:

$$w(K_{TS}) = \sqrt{w^2(X) + w^2(F_{FSM})} \quad (4.4.)$$

Uz faktor pokrivanja k koji je potreban da se dobije razina pouzdanosti od 95% *proširena relativna nesigurnost* posredničkog etalona računa se prema izrazu:

$$W(K_{TS}) = k \times w(K_{TS}) \quad (4.5.)$$

3. Određivanje mjerne nesigurnosti referentnih vrijednosti posredničkih etalona

Kako je posrednički etalon korišten kroz određeno vremensko razdoblje, potrebno je uzeti u obzir utjecaj drifta i to prema izrazu:

$$w^2(D) = \frac{a_{\text{drift}}^2}{3} \quad (4.6.)$$

gdje se vrijednost procjenjuje iz pravokutne raspodjele vjerojatnosti poluširine a_{drift} relativne varijacije osjetljivosti. Ako može biti pretpostavljeno da je drift vremenski ovisan, pravokutna raspodjela vjerojatnosti može se zamijeniti trokutastom prema izrazu:

$$w^2(D) = \frac{a_{\text{drift}}^2}{6} \quad (4.7.)$$

Ta zamjena je opravdana samo ako su umjeravanja posredničkog etalona provedena u relativno kratkom vremenskom periodu, od oko mjesec dana, i ako je umjeravanje referentnog etalona provedeno u otprilike polovici vremena između dva umjeravanja posredničkog etalona u nacionalnom etalonu.

Proširena relativna nesigurnost referentnih vrijednosti posredničkog etalona sile tada iznosi:

$$W_{\text{RV}} = k \times \sqrt{w^2(K_{\text{TS}}) + w^2(D)} \quad (4.8.)$$

4. Određivanje mjerne nesigurnosti realizacije sile na referentnom etalonu sile

Nesigurnosti realizacije sile na referentnom etalonu ovisit će o:

- relativnoj devijaciji između referentnih vrijednosti sile (realiziranih na FSM-u) i vrijednosti realiziranih na referentnom etalonu (FCM-u),
- ponovljivosti realizacije sile na referentnom etalonu uz rotaciju,
- relativnoj devijaciji histereze nacionalnog i referentnog etalona.

Relativna varijanca devijacije srednjih vrijednosti sila $w(\Delta_D)$ računa se (uz trokutastu raspodjelu) prema izrazu:

$$w^2(\Delta_D) = \frac{a_{\text{rel_dev}}^2}{6} \quad (4.9.)$$

Relativna varijanca ponovljivosti uz rotaciju $w(\Delta_R)$ (uz pravokutnu razdiobu) računa se prema izrazu:

$$w^2(\Delta_R) = \frac{a_{\text{rep_fcm}}^2}{3} \quad (4.10.)$$

Relativna varijanca histereze $w(\Delta_H)$ (uz pravokutnu razdiobu) računa se prema izrazu:

$$w^2(\Delta_H) = \frac{a^2_{\text{hys_fcm}}}{3} \quad (4.11.)$$

Iz toga slijedi *kombinirana standardna relativna nesigurnost realizacije sile* na referentnom etalonu $w_{(\text{FCM})}$:

$$w_{(\text{FCM})} = \sqrt{w^2(\Delta_D) + w^2(\Delta_R) + w^2(\Delta_H)} \quad (4.12.)$$

Uz faktor pokrivanja k , *proširena relativna nesigurnost realizacije sile* referentnog etalona $W_{(\text{FCM})}$ iznosi:

$$W_{(\text{FCM})} = k \times w_{(\text{FCM})} \quad (4.13.)$$

5. Određivanje mjerne sposobnosti referentnog etalona sile

Mjerna sposobnost referentnog etalona ovisi o relativnoj nesigurnosti referentnih vrijednosti i o relativnoj nesigurnosti realizacije sile na referentnom etalonu. Kod uređaja komparatornog tipa potrebno je osim toga uzeti u obzir i utjecaj nesigurnosti samog referentnog etalona w_{RT} i procijenjenu dugoročnu nestabilnost referentnog etalona w_{RI} .

Iz toga, *procijenjena mjerna sposobnost* referentnog etalona komparatornog tipa W_{CMC} računa se prema izrazu:

$$W_{\text{CMC}} = k \times \sqrt{w_{\text{RV}}^2 + w_{(\text{FCM})}^2 + w_{\text{RT}}^2 + w_{\text{RI}}^2} \quad (4.14.)$$

4.2. Umjeravanje posredničkih etalona sile prema normi EN ISO 376

Pravila za umjeravanje etalona sile prema normi EN ISO 376 [18] odnose se na one etalone koji se koriste za umjeravanje uređaja za jednoosna tlačna i vlačna naprezanja.

Prema ovoj normi pod pojmom etalona smatra se čitav sklop koji se sastoji od dinamometra, pretvarača signala i uređaja za očitavanje.

Umjeravanje se sastoji od djelovanja poznatom silom na dinamometar i od bilježenja očitavanja na indikatoru.

Osnovne oznake značajne u postupku umjeravanja etalona prema normi EN ISO 376 prikazane su tablicom 4.

Tablica 4 – Veličine pri umjeravanju normom EN ISO 376 [18]

Simbol	Jedinica	Veličina
$b_{(1-3-5)}$	%	Relativna greška ponovljivosti s rotacijom
$b_{(1-2)}$	%	Relativna greška obnovljivosti bez rotacije
F_f	N	Nazivna sila dinamometra
F_N	N	Maksimalna sila umjeravanja
f_c	%	Relativno interpolacijsko odstupanje
f_0	%	Relativno odstupanje nul vrijednosti
i_f	-	Očitavanje na indikatoru nakon rasterećenja
i_0	-	Očitavanje na indikatoru prije opterećenja
r	N	Rezolucija indikatora
v	%	Relativna greška histereze
X	-	Izmjerena vrijednost pri rastućoj sili
X_a	-	Interpolirana vrijednost otklona
X'	-	Izmjerena vrijednost pri padajućoj sili
X_{\max}	-	Maksimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5
X_{\min}	-	Minimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5
X_N	-	Otklon koji odgovara maksimalnoj sili umjeravanja
$X_{sr(1-3-5)}$	-	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri različitom položaju
$X_{sr(1-2)}$	-	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri istom položaju

Svi dijelovi etalona moraju biti zasebno identificirani. Za dinamometar je potrebno naznačiti nazivnu silu.

Dinamometar i dijelovi za povezivanje s opterećenjem moraju biti konstruirani i dimenzionirani tako da osiguraju aksijalno djelovanje bilo vlačne, bilo tlačne sile.

Deformacija opterećenog elastičnog elementa može se mjeriti mehanički, električki, optički ili na neki drugi način, ali s odgovarajućom točnošću i stabilnošću. Način i kvaliteta mjerenja deformacije mogu utjecati na rezultate mjerenja, a time i na klasifikaciju etalona sile.

Prije umjeravanja potrebno je provjeriti da li se etalon uopće može umjeriti. To se može ispitati preliminarnim testovima kao što je test preopterećenjem. U tome se testu četiri puta zaredom etalon izlaže preopterećenju koje bi trebalo biti veće od nazivne sile najmanje 8%, a

najviše 12%. Trajanje preopterećenja iznosi od 1 do 1,5 minuta. Takav test provodi proizvođač etalona prije no što se etalon počne koristiti.

Nadalje je potrebno osigurati:

- da priključni dijelovi mogu osigurati aksijalnu silu kod vlačnih ispitivanja,
- da nema interakcije izmenu dinamometra i njegove potpore na uređaju na kojem se umjerava etalon kod tlačnih ispitivanja.

4.2.1. Rezolucija

Rezolucija je ona minimalna promjena ulazne veličine za koju se još detektira promjena izlazne veličine.

Kod analogne skale udaljenosti susjednih oznaka na skali trebaju biti jednake, a debljina kazaljke i oznaka približno ista. Rezolucija treba biti određena iz omjera širine kazaljke i središnje udaljenosti dvije susjedne oznake na skali (preporučeni su omjeri: 1:2, 1:5, 1:10). Kod digitalne skale rezolucija je jedan prirast zadnje aktivne znamenke brojčanog indikatora.

Rezolucija treba biti prebačena u mjernu jedinicu za silu. Ako očitavanja za neopterećeni uređaj kolebaju više od prije izračunate rezolucije, potrebno je rezoluciju u neopterećenom i mirujućem stanju uvećati za jednu polovinu raspona kolebanja.

4.2.2. Minimalna sila

S obzirom na točnost kojom se može očitati otklon na uređaju u toku umjeravanja ili u toku daljnje upotrebe, minimalna sila F_{\min} koja se primjenjuje na etalonu mora zadovoljiti 2 uvjeta:

- a) Za određenu klasu mora iznositi:

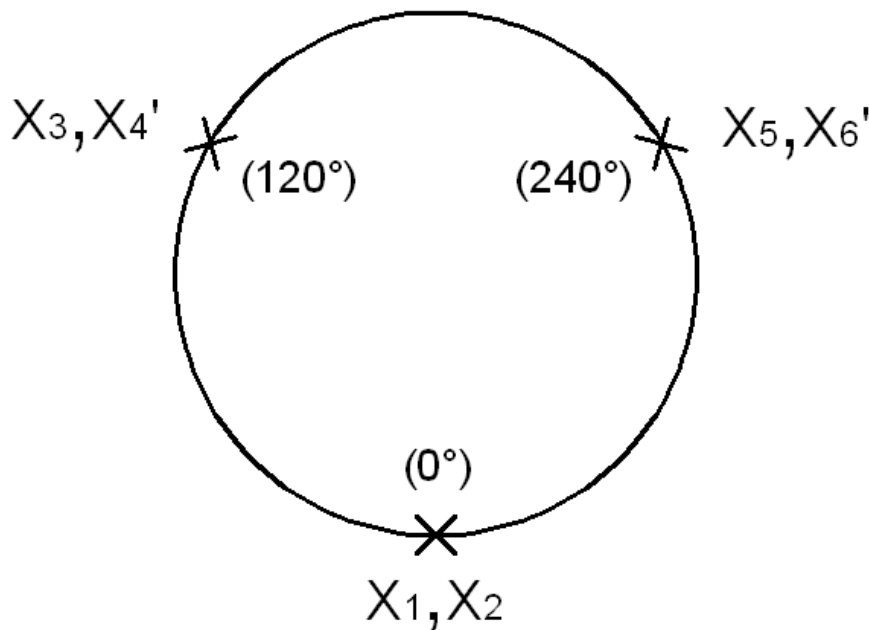
F_{\min}	Klasa etalona
$\geq 4000 \times r$	00
$\geq 2000 \times r$	0,5
$\geq 1000 \times r$	1
$\geq 500 \times r$	2

- b) Minimalna sila mora biti jednaka ili veća od $0,02 F_f$ – maksimalnog kapaciteta dinamometra.

4.2.3. Postupak umjeravanja

Prije nego što se etalon optereti silama za umjeravanje u zadanom smjeru (tlak ili vlak), potrebno ga je predopteretiti. Na uređaj se treba tri puta djelovati maksimalnom silom, svaki puta u trajanju od 1 do 1,5 minute. Predopterećenja moraju biti u istom smjeru i moraju djelovati na istom položaju kao i opterećenje, tj. sila koja slijedi nakon njih. Prije svake promjene smjera opterećenja u toku umjeravanja, potrebno je predopteretiti etalon u tom novom smjeru.

Silama za umjeravanje etalon se opterećuje u ukupno 6 mjernih nizova. Prva dva niza sila (X_1 i X_2) su nizovi rastućih iznosa sila, bez da se mijenja položaj dinamometra (tj. položaj na 0°). Zatim slijede još četiri niza opterećenja. Treći niz (X_3) je rastući, a četvrti (X_4) padajući, oni imaju isti korak, a određuju se za položaj dinamometra zarotiranog za 120° . Zatim se dinamometar rotira na položaj 240° od početnog te se opterećuje petim nizom rastućih sila (X_5) i šestim nizom opadajućih (X_6). (slika 20).



Slika 20 - Pozicije dinamometra pri umjeravanju prema ISO 376 [18]

Da bi se mogla odrediti interpolacijska krivulja za rezultate umjeravanja, potrebno je po svakom mjernom nizu imati barem osam mjernih točaka sila različitih iznosa, a one trebaju biti što ravnomjernije raspoređene unutar raspona sile u mjernom nizu.

U svakom mjernom nizu bilježe se i nulta očitavanja (kad ne djeluje sila), i to prije početka djelovanja sile i nakon djelovanja sile najmanje 30 sekundi, a između susjednih nizova

mjerenja treba pričekati barem 3 minute. Značajnija promjena nultih očitavanja može ukazivati na plastičnu deformaciju uslijed preopterećenja dinamometra. Vremenski intervali između mjernih točaka unutar jednog mjernog niza trebaju biti što sličniji, a očitavanja bi se trebala raditi nakon najmanje 30 sekundi od početka djelovanja opterećenja.

U toku umjeravanja uređaji s odvojivim dijelovima trebali bi se barem jednom rastaviti, uglavnom između drugog i trećeg mjernog niza, a nakon sastavljanja potrebno je ponovno predopteretiti uređaj maksimalnom silom i to barem tri puta.

Temperatura bi u toku umjeravanja trebala biti između 18°C i 28°C i stabilna s promjenom najviše $\pm 1^\circ\text{C}$. Temperaturu treba zabilježiti te treba omogućiti etalonu da postigne stabilnu temperaturu.

4.2.4. Kriteriji za ocjenjivanje etalona

Relativna greška obnovljivosti s rotacijom ($b_{(1-3-5)}$)

Računa se za svaku silu umjeravanja, na temelju mjernih nizova 1, 3 i 5, iz sljedećih izraza:

$$b_{(1-3-5)} = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\text{sr}(1-3-5)}} \right| \times 100 \quad [\%] \quad (4.15.)$$

pri čemu je
$$X_{\text{sr}(1-3-5)} = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} \quad [\%] \quad (4.16.)$$

Relativna greška ponovljivosti bez rotacije ($b_{(1-2)}$)

Računa se za svaku silu umjeravanja, na temelju nizova 1 i 2, prema izrazu:

$$b_{(1-2)} = \left| \frac{X_2 - X_1}{X_{\text{sr}(1-2)}} \right| \times 100 \quad [\%] \quad (4.17.)$$

pri čemu je
$$X_{\text{sr}(1-2)} = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad [\%] \quad (4.18.)$$

Relativno interpolacijsko odstupanje (f_c)

Određuje se za polinom 1., 2., 3. (ili višeg stupnja) koji određuje ovisnost izlaznih podataka o sili, a dobiven je iz rezultata mjerenja. Iz te vrijednosti može se procijeniti koliko dobro točke interpolirane polinomom X_a aproksimiraju stvarne podatke umjeravanja. Ona se računa iz izraza:

$$f_c = \frac{X_{\text{sr}(1-3-5)} - X_a}{X_a} \times 100 \quad [\%] \quad (4.19.)$$

Relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0)

Dobiva se iz očitavanja nul vrijednosti prije i poslije svakog mjernog niza, i to oko 30 sekundi nakon rasterećenja, prema izrazu:

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100 \quad [\%] \quad (4.20.)$$

Kod klasifikacije etalona u razmatranje se uzima najveće dobiveno odstupanje nul vrijednosti.

Relativna greška histereze (v)

Računa se pri umjeravanju za susjedne mjerne nizove kod kojih je jedan rastući, a drugi opadajući. Histereza znači da pri istoj ulaznoj sili, izlazne vrijednosti neće biti jednake u rastućem i u opadajućem nizu. Iz razlike tih vrijednosti računa se relativna greška histereze:

- za mjerne nizove s rotacijom dinamometra za 120° :

$$v_1 = \left| \frac{X_4'' - X_3}{X_3} \right| \times 100 \quad [\%] \quad (4.21.)$$

- za mjerne nizove s rotacijom dinamometra za 240° :

$$v_2 = \left| \frac{X_6'' - X_5}{X_5} \right| \times 100 \quad [\%] \quad (4.22.)$$

- konačna vrijednost pri nekoj sili je njihova aritmetička sredina:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad [\%] \quad (4.23.)$$

4.2.5. Klasifikacija posredničkih etalona

Raspon za koji se klasificira uređaj određuje se tako da se u obzir uzima svaka mjerna točka umjeravanja, jedna za drugom, počevši od maksimalne pa prema minimalnoj. Raspon klasifikacije završava kod zadnje sile za koju su još zadovoljeni uvjeti klasifikacije, a on bi trebao pokriti područje od barem 50% – 100% nazivne sile F_N .

Prijenosni etalon može biti klasificiran ili za točno određene vrijednosti sile ili za interpolirane vrijednosti sile.

Kod etalona za točno određene vrijednosti sile kriteriji za klasifikaciju su:

- relativne pogreške ponovljivosti i obnovljivosti,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna pogreška histereze.

Kod etalona za interpolirane vrijednosti sile kriteriji za klasifikaciju su:

- relativne pogreške ponovljivosti i obnovljivosti,
- relativno interpolacijsko odstupanje,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna pogreška histereze.

Prema iznosima zadanih kriterija određuje se kojoj od četiri klase pripada umjeravani prijenosni etalon (tablica 5). Da bi etalon u nekom mjernom području pripadao određenoj klasi, moraju istovremeno biti zadovoljeni baš svi kriteriji. Ako samo jedan kriterij nije zadovoljen, tada će etalon pripadati klasi određenoj tim kriterijem.

Tablica 5 – Karakteristike posredničkih etalona [18]

Klasa	Relativne pogreške, %					Nesigurnost primjenjene sile umjeravanja, % (za $k = 2$)
	$b_{(1-3-5)}$	$b_{(1-2)}$	f_c	f_0	v	
00	0,05	0,025	$\pm 0,025$	$\pm 0,012$	0,07	$\pm 0,01$
0,5	0,10	0,05	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$	0,15	$\pm 0,02$
1	0,20	0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,050$	0,30	$\pm 0,05$
2	0,40	0,20	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$	0,50	$\pm 0,10$

4.3. Određivanje mjerne nesigurnosti umjeravanja posredničkih etalona

Iz rezultata umjeravanja posredničkih etalona procjenjuju se slijedeće nesigurnosti [13]:

- **nesigurnost nultog odstupanja (w_{nul})**

Procjena standardne nesigurnosti zbog utjecaja nultog odstupanja temelji se na pravokutnoj distribuciji i iznosi:

$$w_{nul} = \frac{a_{nul}}{\sqrt{3}} \quad (4.24.)$$

- **nesigurnost ponovljivosti bez rotacije (w_{pon})**

Procjena nesigurnosti temelji se na pravokutnoj distribuciji i računa se prema izrazu:

$$w_{pon} = \frac{a_{pon}}{\sqrt{3}} \quad (4.25.)$$

- **nesigurnost obnovljivosti sa rotacijom (w_{rot})**

Procjena nesigurnosti koja nastaje uslijed zakretanja dinamometra za određeni kut, temelji se na distribuciji u obliku slova U i računa se prema izrazu:

$$w_{\text{obn}} = \frac{a_{\text{obn}}}{\sqrt{2}} \quad (4.26.)$$

- **nesigurnost interpolacijskog odstupanja (w_{int})**

Procjena standardne nesigurnosti uslijed utjecaja interpolacije provodi se prema trokutastoj distribuciji i računa se prema izrazu:

$$w_{\text{int}} = \frac{a_{\text{int}}}{\sqrt{6}} \quad (4.27.)$$

- **nesigurnost rezolucije uređaja za očitavanje (w_{rez})**

Procjena standardne nesigurnosti uslijed rezolucije uređaja provodi se na temelju pravokutne distribucije i računa se prema izrazu:

$$w_{\text{rez}} = \frac{a_{\text{rez}}}{\sqrt{3}} \quad (4.28.)$$

- **nesigurnost histereze (w_{his})**

Procjena standardne nesigurnosti uslijed histereze uređaja provodi se na temelju pravokutne distribucije, te računa se prema izrazu:

$$w_{\text{his}} = \frac{a_{\text{his}}}{\sqrt{3}} \quad (4.29.)$$

- **Sastavljena standardna nesigurnost dinamometra (w_{din})**

Sastavljena standardna nesigurnost dinamometra posredničkog etalona predstavlja grafički zbroj svih standardnih nesigurnosti izračunatih iz rezultata umjeravanja posredničkog etalona u referentnom etalonu, i određuje se prema jednadžbi:

$$w_{\text{din}} = \sqrt{w_{\text{nul}}^2 + w_{\text{pon}}^2 + w_{\text{rot}}^2 + w_{\text{int}}^2 + w_{\text{rez}}^2 + w_{\text{his}}^2} \quad (4.30.)$$

- **Proširena mjerna nesigurnost dinamometra (W_{din})**

Proširena mjerna nesigurnost dobiva se ukoliko u obzir uzmemo faktor pokrivanja k , te se računa slijedećom jednadžbom:

$$W_{\text{din}} = k \times w_{\text{din}} \quad (4.31.)$$

- **Sastavljena standardna nesigurnost posredničkog etalona (w_{TS})**

U sastavljenu standardnu nesigurnost posredničkog etalona sastoji se od najveće mjerne sposobnosti umjeriteljskog laboratorija i sastavljene standardne nesigurnosti dinamometra, a računa se prema izrazu:

$$w_{TS} = \sqrt{w_{\text{ref}}^2 + w_{\text{din}}^2} \quad (4.32.)$$

- **Proširena mjerna nesigurnost posredničkog etalona (W_{TS})**

Uz faktor pokrivanja k , proširena mjerna nesigurnost posredničkog etalona iznosi:

$$W_{TS} = k \times w_{TS} \quad (4.33.)$$

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada proveden je postupak umjeravanja posredničkih etalona sile, obrađeni su dobiveni rezultati mjerenja te je provedena analiza rezultata u usporedbi s rezultatima dobivenim umjeravanjem posredničkih etalona u nacionalnom etalonu PTB-a. Umjeravana su tri posrednička etalona sile s dinamometrom tipa Z4A, nazivnih sila 50 kN, 100 kN i 500 kN. Sva umjeravanja provedena su pri tlačnom opterećenju.

Prvo je provedeno umjeravanje posredničkih etalona u nacionalnom etalonu sile PTB-a, nakon čega su isti posrednički etaloni umjeravani u referentnom etalonu sile LIMS-a. Sva umjeravanja provedena su u skladu s normom EN ISO 376 koja je detaljnije opisana u poglavlju 4.2. Mjerni nizovi etalona sadrže po deset mjernih točaka od 10 % do 100 % nazivne sile. Korak promjene sile u nizu je konstantan i iznosi 10 % nazivne sile posredničkog etalona. Očitavanja su izražena kao promjena napona na pojačalu u mV/V.

Dodatno su provedena dugotrajna mjerenja preko dana i preko noći, u svrhu utvrđivanja eventualnih okolišnih utjecaja (blizina prometnice) na rezultate mjerenja, te mjerenja gdje se usred provedbe mjerenja smanjila temperatura prostorije u svrhu utvrđivanja utjecaja tako nagle promjene temperature na rezultate mjerenja.

Nakon provedenih postupaka umjeravanja, dobiveni rezultati su obrađeni, te je provedena usporedba rezultata dobivenih umjeravanjem posredničkih etalona u PTB-u i LIMS-u.

5.1. Rezultati umjeravanja

Kao početni korak eksperimentalnog dijela rada provedeno je umjeravanje posredničkih etalona **Z4A/50 kN**, **Z4A/100 kN** i **Z4A/500 kN** u nacionalnom etalonu PTB – a, na etalonu koji ostvaruje opterećenje direktno utezima, sa mjernom sposobnošću $\leq 0,002\%$, a potom je provedeno njihovo umjeravanje i u referentnom etalonu LIMS – a, s mjernim sustavom komparatornog tipa i s procjenjenom mjernom sposobnošću $\leq 0,05\%$. Sva umjeravanja provedena su u skladu s normom EN ISO 376. Svi rezultati odnose se na umjeravanja provedena na posredničkim etalonima pri tlačnom opterećenju.

5.1.1. Umjeravanje posredničkih etalona u nacionalnom etalonu sile PTB-a

Ovdje su dani rezultati umjeravanja posredničkih etalona **Z4A/50 kN**, **Z4A/100 kN** i **Z4A/500 kN** u nacionalnom etalonu PTB-a, te njihovi izračunati kriteriji za klasifikaciju etalona prema normi EN ISO 376, koji su nadalje korišteni u prikazima i usporedbama s rezultatima umjeravanja posredničkih etalona u referentnom etalonu LIMS-a, te analiziranju rezultata.

Rezultati umjeravanja posredničkih etalona Z4A/50 kN, Z4A/100 kN i Z4A/500 kN u nacionalnom etalonu PTB-a prikazani su u tablicama 6, 7 i 8.

Tablica 6 – Rezultati umjeravanja etalona Z4A/50 kN u nacionalnom etalonu PTB-a

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	X_1 , mV/V	X_2 , mV/V	X_3 , mV/V	X_4'' , mV/V	X_5 , mV/V	X_6'' , mV/V
5	0,199884	0,199886	0,199876	0,199901	0,199875	0,199897
10	0,399789	0,399793	0,399763	0,399804	0,399763	0,399802
15	0,599700	0,599705	0,599662	0,599713	0,599663	0,599714
20	0,799621	0,799626	0,799572	0,799627	0,799571	0,799623
25	0,999553	0,999559	0,999497	0,999548	0,999496	0,999543
30	1,199497	1,199507	1,199438	1,199478	1,199439	1,199476
35	1,399462	1,399472	1,399396	1,399418	1,399402	1,399415
40	1,599441	1,599453	1,599369	1,599371	1,599375	1,599370
45	1,799434	1,799443	1,799356	1,799349	1,799360	1,799349
50	1,999441	1,999449	1,999359		1,999361	

Tablica 7 – Rezultati umjeravanja etalona Z4A/100 kN u nacionalnom etalonu PTB-a

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	X_1 , mV/V	X_2 , mV/V	X_3 , mV/V	X_4'' , mV/V	X_5 , mV/V	X_6'' , mV/V
10	0,199944	0,199941	0,199936	0,200004	0,199942	0,199999
20	0,399883	0,399876	0,399874	0,399963	0,399871	0,399949
30	0,599824	0,599819	0,599805	0,599905	0,599801	0,599884
40	0,799773	0,799766	0,799746	0,799846	0,799736	0,799825
50	0,999725	0,999722	0,999694	0,999787	0,999679	0,999764
60	1,199686	1,199678	1,199644	1,199720	1,199630	1,199703
70	1,399647	1,399642	1,399600	1,399658	1,399589	1,399641
80	1,599620	1,599611	1,599562	1,599599	1,599556	1,599582
90	1,799593	1,799590	1,799527	1,799543	1,799519	1,799532
100	1,999568	1,999567	1,999497		1,999489	

Tablica 8 – Rezultati umjeravanja etalona Z4A/500 kN u nacionalnom etalonu PTB-a

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	X_1 , mV/V	X_2 , mV/V	X_3 , mV/V	X_4'' , mV/V	X_5 , mV/V	X_6'' , mV/V
50	0,199852	0,199818	0,199836	0,199903	0,199838	0,199903
100	0,399660	0,399634	0,399656	0,399730	0,399636	0,399737
150	0,599487	0,599445	0,599468	0,599557	0,599463	0,599549
200	0,799304	0,799265	0,799257	0,799373	0,799257	0,799384
250	0,999138	0,999093	0,999109	0,999195	0,999106	0,999186
300	1,198975	1,198920	1,198942	1,199019	1,198933	1,199050
350	1,398817	1,398736	1,398796	1,398844	1,398780	1,398867
400	1,598683	1,598594	1,598640	1,598700	1,598636	1,598702
450	1,798541	1,798469	1,798488	1,798519	1,798491	1,798478
500	1,998401	1,998296	1,998342		1,998350	

U nastavku su dati kriteriji za klasifikaciju posredničkih etalona Z4A/50 kN, Z4A/100 kN i Z4A/500 kN a prikazani su u tablicama 9, 10, 11.

Tablica 9 – Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/50 kN umjeravanog u PTB-u

Sila, kN	$X_{sr(1-2)}$, mV/V	$X_{sr(1-3-5)}$, mV/V	$b_{(1-2)}$, %	$b_{(1-3-5)}$, %	v , %	f_c , %	U , %
5	0,199885	0,199878	0,001	0,005	0,012	0,000	0,008
10	0,399791	0,399772	0,001	0,007	0,010	0,000	0,008
15	0,599703	0,599675	0,001	0,006	0,009	0,000	0,007
20	0,799624	0,799588	0,001	0,006	0,007	0,000	0,006
25	0,999556	0,999515	0,001	0,006	0,005	0,000	0,005
30	1,199502	1,199458	0,001	0,005	0,003	0,000	0,005
35	1,399467	1,399420	0,001	0,005	0,001	0,000	0,005
40	1,599447	1,599395	0,001	0,005	0,000	0,000	0,005
45	1,799439	1,799383	0,001	0,004	-0,001	0,000	0,005
50	1,999445	1,999387	0,000	0,004		0,000	0,005

Tablica 10 – Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/100 kN umjeravanog u PTB-u

Sila, kN	$X_{sr(1-2)},$ mV/V	$X_{sr(1-3-5)},$ mV/V	$b_{(1-2)},$ %	$b_{(1-3-5)},$ %	$v,$ %	$f_c,$ %	$U,$ %
10	0,199943	0,199941	0,002	0,004	0,031	0,003	0,019
20	0,399880	0,399876	0,002	0,003	0,021	0,001	0,013
30	0,599822	0,599810	0,001	0,004	0,015	0,000	0,010
40	0,799770	0,799752	0,001	0,005	0,012	0,000	0,008
50	0,999724	0,999699	0,000	0,005	0,009	0,000	0,007
60	1,199682	1,199653	0,001	0,005	0,006	0,000	0,007
70	1,399645	1,399612	0,000	0,004	0,004	0,000	0,007
80	1,599616	1,599579	0,001	0,004	0,002	0,000	0,007
90	1,799592	1,799546	0,000	0,004	0,001	0,000	0,007
100	1,999568	1,999518	0,000	0,004		0,000	0,007

Tablica 11 – Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/500 kN umjeravanog u PTB-u

Sila, kN	$X_{sr(1-2)},$ mV/V	$X_{sr(1-3-5)},$ mV/V	$b_{(1-2)},$ %	$b_{(1-3-5)},$ %	$v,$ %	$f_c,$ %	$U,$ %
50	0,199835	0,199842	0,017	0,008	0,033	0,009	0,023
100	0,399647	0,399651	0,007	0,006	0,022	0,001	0,014
150	0,599466	0,599473	0,007	0,004	0,015	0,001	0,010
200	0,799285	0,799273	0,005	0,006	0,015	-0,002	0,010
250	0,999116	0,999118	0,005	0,003	0,008	0,000	0,006
300	1,198948	1,198950	0,005	0,004	0,008	0,000	0,006
350	1,398777	1,398798	0,006	0,003	0,005	0,000	0,006
400	1,598639	1,598653	0,006	0,003	0,004	0,001	0,006
450	1,798505	1,798507	0,004	0,003	0,001	0,000	0,006
500	1,998349	1,998364	0,005	0,003		0,000	0,006

5.1.2. Umjeravanje posredničkog etalona Z4A/50 kN u referentnom etalonu sile LIMS-a

Za posrednički etalon Z4A/50 kN umjeravan u referentnom etalonu LIMS-a dati su rezultati umjeravanja te je pobliže objašnjen njihov značaj, dok su u nastavku za ostale posredničke etalone dati samo rezultati umjeravanja za koje vrijede iste značajke.

Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/50 kN u referentnom etalonu LIMS-a prikazani su u tablici 12.

Tablica 12 – Rezultati umjeravanja etalona Z4A/50 kN u referentnom etalonu LIMS-a

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	X ₁ , mV/V	X ₂ , mV/V	X ₃ , mV/V	X ₄ ", mV/V	X ₅ , mV/V	X ₆ ", mV/V
5	0,199636	0,199634	0,199609	0,199609	0,199609	0,199609
10	0,399797	0,399784	0,399721	0,399788	0,399753	0,399805
15	0,599717	0,599727	0,599637	0,599673	0,599697	0,599743
20	0,799651	0,799640	0,799530	0,799579	0,799615	0,799667
25	0,999558	0,999578	0,999426	0,999514	0,999527	0,999582
30	1,199469	1,199503	1,199337	1,199392	1,199424	1,199488
35	1,399401	1,399427	1,399228	1,399257	1,399361	1,399374
40	1,599293	1,599313	1,599149	1,599159	1,599239	1,599276
45	1,799334	1,799366	1,799168	1,799143	1,799290	1,799295
50	1,999267	1,999278	1,999106		1,999225	

Rezultati mjerenja ukazuju na vezu između primjenjene sile i očitane promjene napona, a ona se prikazuje polinomom nekog stupnja. Za dobivanje odgovarajućeg polinoma koristi se metoda najmanjih kvadrata koja dobro kompenzira i neke nesavršenosti koje mogu utjecati na oblik interpolacijske krivulje.

Relativno interpolacijsko odstupanje za neki polinom je to veće, što je pripadajuća sila manja. Također, pri manjim silama znatna je i razlika između interpolacijskih odstupanja različitih polinoma, a odstupanje je veće, što je stupanj polinoma niži. Kako je za klasu posredničkih etalona 00 dozvoljeno relativno interpolacijsko odstupanje $\pm 0,025\%$, za interpolaciju rezultata mjerenja može se uzeti polinom 3. ili višeg stupnja. Takvim polinomom može se dobiti interpolirana vrijednosti za bilo koji iznos sile od 5 kN do 50 kN.

Dakle dobivena jednadžba umjeravanja posredničkog etalona Z4A/50 kN je polinom 3. stupnja:

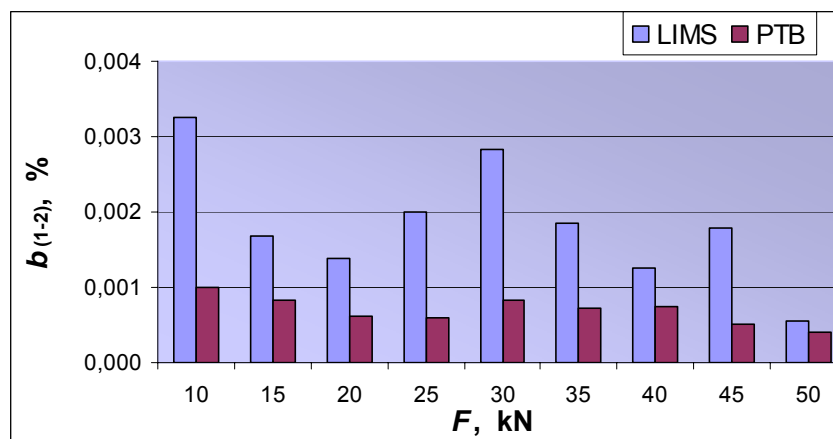
$$y = - 5,0268632347 \cdot 10^{-9} X^3 + 5,6297756473 \cdot 10^{-7} X^2 + 3,9967996319 \cdot 10^{-2} X$$

U tablici 13 prikazani su iznosi kriterija za klasifikaciju posredničkih etalona: relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije $b_{(1-2)}$, relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom $b_{(1-3-5)}$, relativne pogreške histereze v i relativnog interpolacijskog odstupanja f_c . Za svaki iznos sile od 5 kN do 50 kN s korakom od 5 kN dane su i srednje vrijednosti očitavanja $X_{sr(1-2)}$ i $X_{sr(1-3-5)}$. Sve vrijednosti odnose se na posrednički etalon umjeravan u LIMS-u.

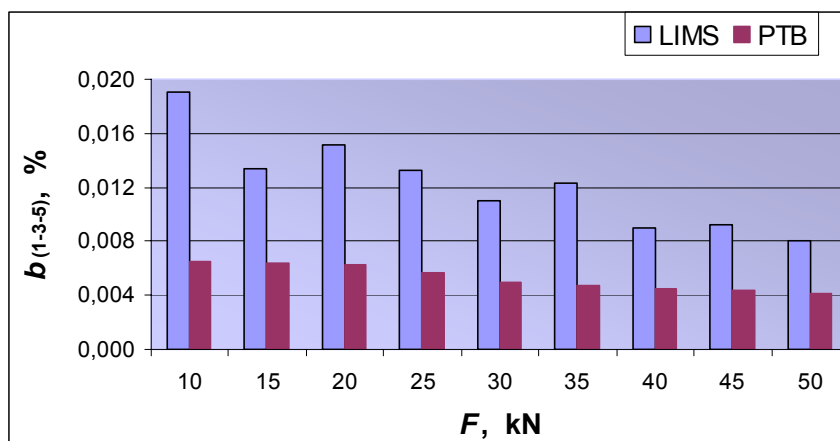
Tablica 13 – Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/50 kN umjeravanog u LIMS-u

Sila, kN	$X_{sr(1-2)}$, mV/V	$X_{sr(1-3-5)}$, mV/V	$b_{(1-2)}$, %	$b_{(1-3-5)}$, %	v , %	f_c , %	U , %
5	0,199635	0,199618	0,001	0,014	0,000	-0,118	0,070
10	0,399790	0,399757	0,003	0,019	0,015	0,006	0,053
15	0,599722	0,599684	0,002	0,013	0,007	0,009	0,051
20	0,799645	0,799599	0,001	0,015	0,006	0,007	0,051
25	0,999568	0,999504	0,002	0,013	0,007	0,003	0,051
30	1,199486	1,199410	0,003	0,011	0,005	0,000	0,051
35	1,399414	1,399330	0,002	0,012	0,002	-0,002	0,051
40	1,599303	1,599227	0,001	0,009	0,001	-0,004	0,050
45	1,799350	1,799264	0,002	0,009	-0,001	0,001	0,050
50	1,999272	1,999199	0,001	0,008		0,001	0,050

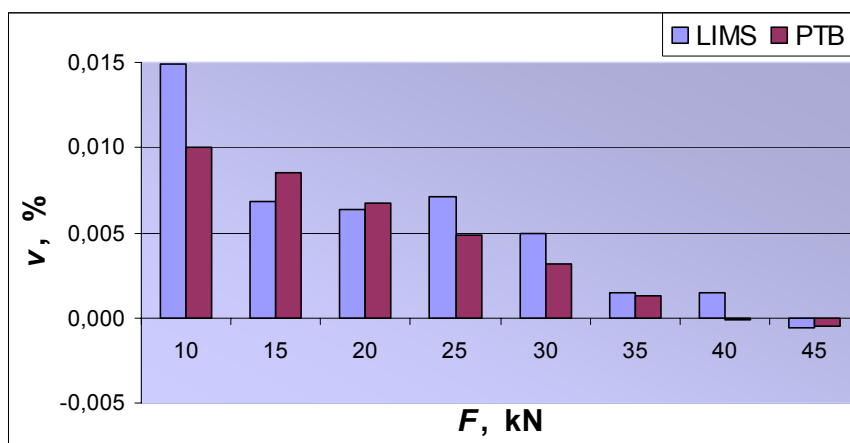
Na slikama 21, 22, 23 i 24 su grafički zajedno prikazani dobiveni rezultati kriterija za ocjenjivanje u ovisnosti o iznosu narinute sile etalona Z4A/50 kN umjeravanog u PTB-u i LIMS-u.



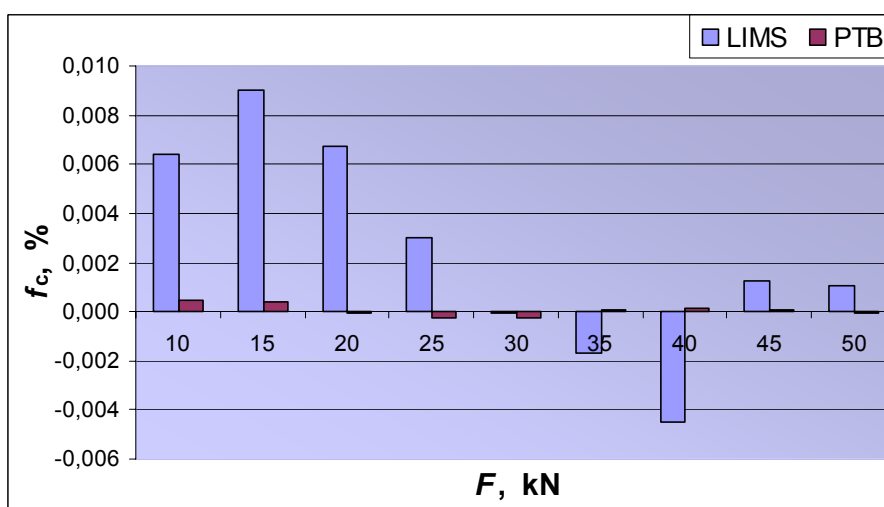
Slika 21 – Usporedni prikaz relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/50 kN



Slika 22 – Usporedni prikaz relativne greške obnovljivosti sa rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4A/50 kN

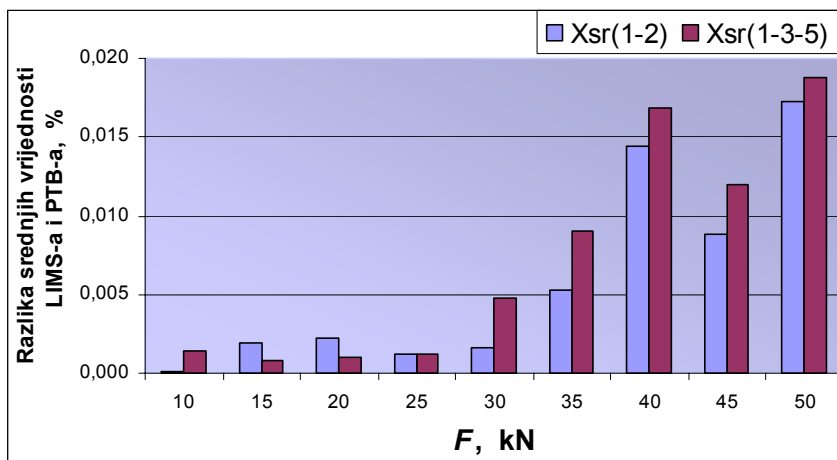


Slika 23 – Usporedni prikaz relativne pogreške histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4A/50 kN



Slika 24 – Usporedni prikaz relativne pogreške interpolacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/50 kN

Slika 25 prikazuje razlike srednjih vrijednosti očitavanja posredničkog etalona Z4A/50 kN između LIMS-a i PTB-a.



Slika 25 – Usporedni prikaz razlika srednjih vrijednosti očitavanja u ovisnosti o sili za etalon Z4A/50 kN

5.1.3. Umjeravanje posredničkog etalona Z4A/100 kN u referentnom etalonu sile LIMS-a

Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/100 kN u referentnom etalonu LIMS-a, te iznosi kriterija za klasifikaciju istog prikazani su u tablicama 14 i 15.

Tablica 14 – Rezultati umjeravanja etalona Z4A/100 kN u referentnom etalonu LIMS-a

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	X_1 , mV/V	X_2 , mV/V	X_3 , mV/V	X_4'' , mV/V	X_5 , mV/V	X_6'' , mV/V
10	0,199941	0,199948	0,199905	0,199955	0,199925	0,200021
20	0,399910	0,399915	0,399857	0,399909	0,399896	0,399963
30	0,599782	0,599788	0,599737	0,599786	0,599773	0,599850
40	0,799647	0,799654	0,799598	0,799646	0,799639	0,799743
50	0,999582	0,999578	0,999523	0,999571	0,999573	0,999650
60	1,199454	1,199453	1,199389	1,199434	1,199442	1,199522
70	1,399370	1,399363	1,399302	1,399337	1,399364	1,399423
80	1,599338	1,599341	1,599256	1,599277	1,599342	1,599381
90	1,799243	1,799245	1,799171	1,799161	1,799251	1,799271
100	1,999172	1,999184	1,999091		1,999182	

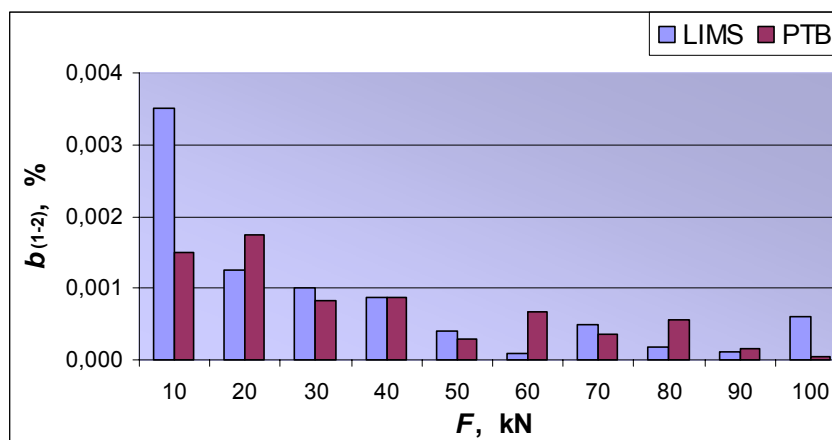
Jednadžba umjeravanja posredničkog etalona Z4A/100 kN (polinom 3. stupnja) je:

$$y = 7,7180751785 \cdot 10^{-10} X^3 - 1,0376491094 \cdot 10^{-7} X^2 + 1,9994311004 \cdot 10^{-2} X$$

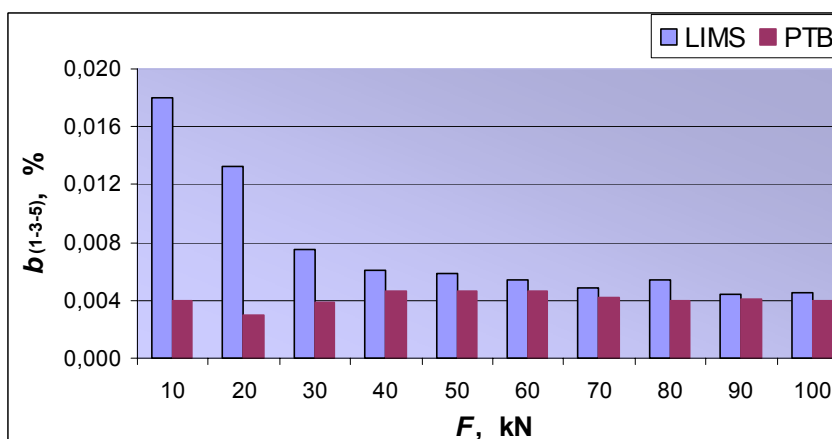
Tablica 15 – Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/100 kN umjeravanog u LIMS-u

Sila, kN	$X_{sr(1-2)}$, mV/V	$X_{sr(1-3-5)}$, mV/V	$b_{(1-2)}$, %	$b_{(1-3-5)}$, %	v , %	f_c , %	U , %
10	0,199944	0,199924	0,004	0,018	0,037	-0,005	0,062
20	0,399912	0,399888	0,001	0,013	0,015	0,009	0,053
30	0,599785	0,599764	0,001	0,008	0,011	0,001	0,051
40	0,799650	0,799628	0,001	0,006	0,010	-0,003	0,051
50	0,999580	0,999559	0,000	0,006	0,006	0,001	0,051
60	1,199453	1,199428	0,000	0,005	0,005	-0,002	0,050
70	1,399366	1,399345	0,001	0,005	0,003	-0,001	0,050
80	1,599339	1,599312	0,000	0,005	0,002	0,002	0,050
90	1,799244	1,799222	0,000	0,004	0,000	0,001	0,050
100	1,999178	1,999148	0,001	0,005		-0,001	0,050

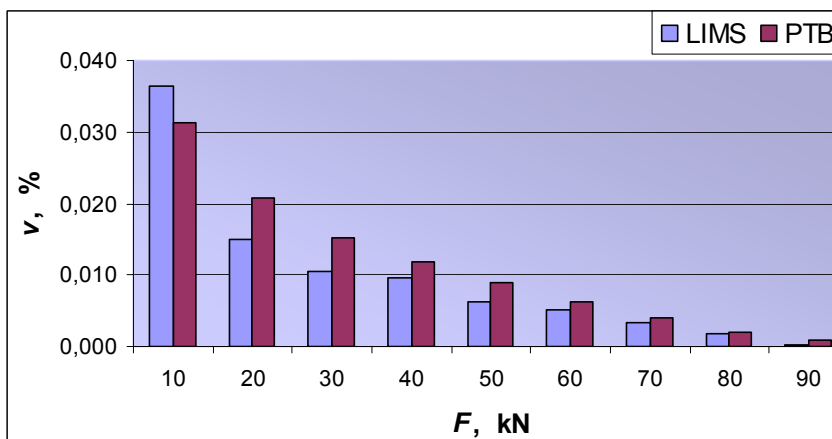
Na slikama 26, 27, 28 i 29 su grafički prikazani dobiveni rezultati kriterija za ocjenjivanje u ovisnosti o iznosu narinute sile etalona Z4A/100 kN umjeravanog u PTB-u i LIMS-u.



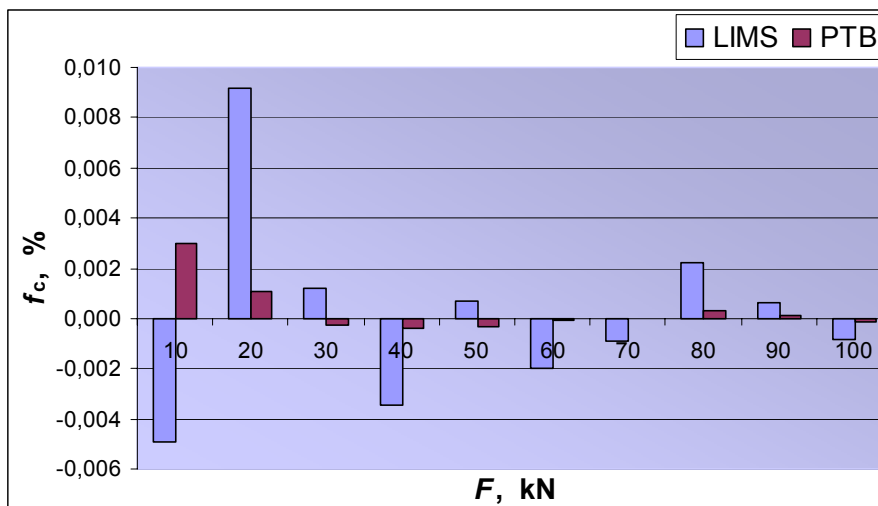
Slika 26 – Usporedni prikaz relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/100 kN



Slika 27 – Usporedni prikaz relativne pogreške obnovljivosti sa rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4A/100 kN

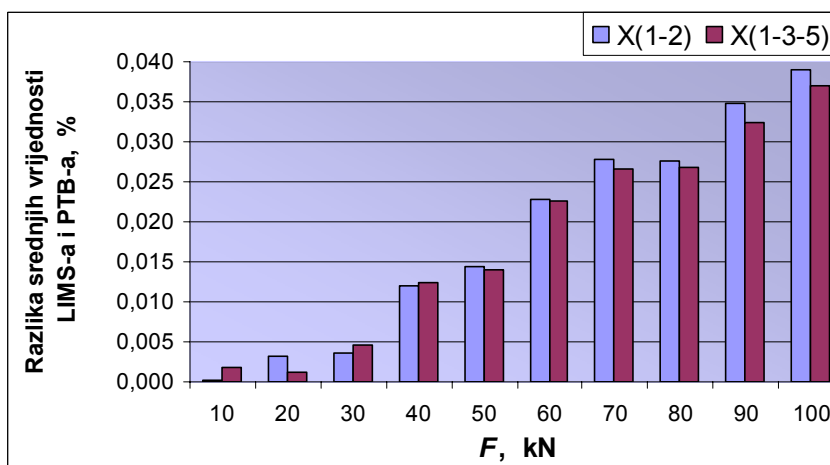


Slika 28 – Usporedni prikaz relativne pogreške histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4A/100 kN



Slika 29 – Usporedni prikaz relativne pogreške interpolacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/100 kN

Slika 30 prikazuje razlike srednjih vrijednosti očitavanja posredničkog etalona Z4A/100 kN između LIMS-a i PTB-a.



Slika 30 – Usporedni prikaz razlika srednjih vrijednosti očitavanja u ovisnosti o sili za etalon Z4A/100 kN

5.1.4. Umjeravanje posredničkog etalona Z4A/500 kN u referentnom etalonu sile LIMS-a

Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500 kN u referentnom etalonu LIMS-a, te iznosi kriterija za klasifikaciju istog prikazani su u tablicama 16 i 17.

Tablica 16 – Rezultati umjeravanja etalona Z4A/500 kN u referentnom etalonu LIMS-a

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	X_1 , mV/V	X_2 , mV/V	X_3 , mV/V	X_4'' , mV/V	X_5 , mV/V	X_6'' , mV/V
50	0,199811	0,199806	0,199812	0,200104	0,199816	0,200100
100	0,399608	0,399603	0,399614	0,399963	0,399615	0,399968
150	0,599675	0,599669	0,599676	0,599805	0,599691	0,599807
200	0,799539	0,799533	0,799536	0,799658	0,799547	0,799668
250	0,999402	0,999389	0,999401	0,999538	0,999412	0,999544
300	1,199286	1,199278	1,199288	1,199420	1,199298	1,199428
350	1,399131	1,399119	1,399136	1,399256	1,399149	1,399272
400	1,598993	1,598987	1,599002	1,599094	1,599019	1,599106
450	1,798866	1,798856	1,798875	1,798929	1,798890	1,798939
500	1,998786	1,998778	1,998797		1,998807	

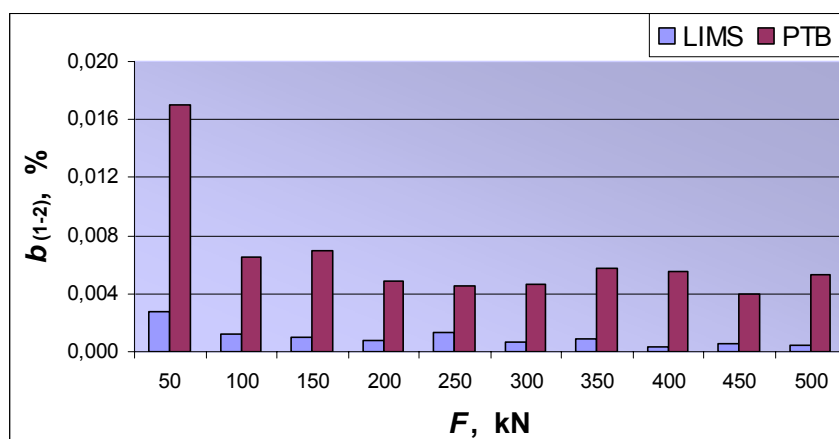
Jednadžba umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500 kN (polinom 3. stupnja) je:

$$y = -4,3761722312 \cdot 10^{-12} X^3 + 3,2143030035 \cdot 10^{-9} X^2 + 3,9970093781 \cdot 10^{-3} X$$

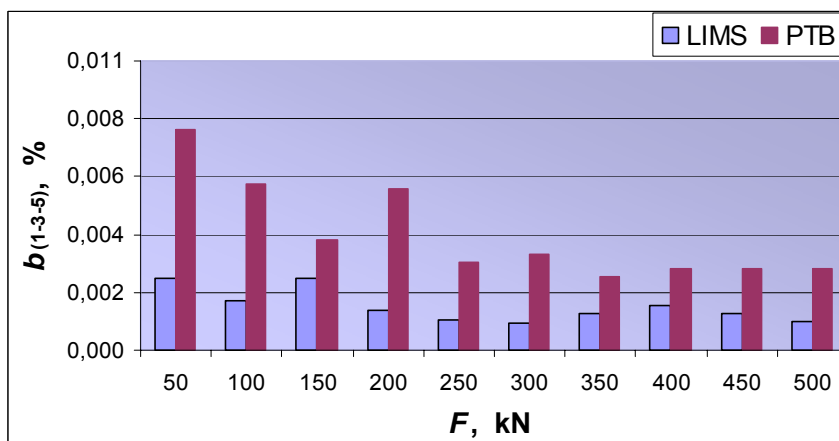
Tablica 17 – Kriteriji za klasifikaciju etalona Z4A/500 kN umjeravanog u LIMS-u

Sila, kN	$X_{sr(1-2)}$, mV/V	$X_{sr(1-3-5)}$, mV/V	$b_{(1-2)}$, %	$b_{(1-3-5)}$, %	v , %	f_c , %	U , %
50	0,199808	0,199813	0,003	0,003	0,144	-0,022	0,115
100	0,399605	0,399612	0,001	0,002	0,088	-0,029	0,081
150	0,599672	0,599681	0,001	0,003	0,020	0,012	0,053
200	0,799536	0,799541	0,001	0,001	0,015	0,006	0,051
250	0,999395	0,999405	0,001	0,001	0,013	0,002	0,051
300	1,199282	1,199290	0,001	0,001	0,011	0,001	0,051
350	1,399125	1,399139	0,001	0,001	0,009	-0,001	0,050
400	1,598990	1,599005	0,000	0,002	0,006	-0,002	0,050
450	1,798861	1,798877	0,001	0,001	0,003	-0,002	0,050
500	1,998782	1,998797	0,000	0,001		0,002	0,050

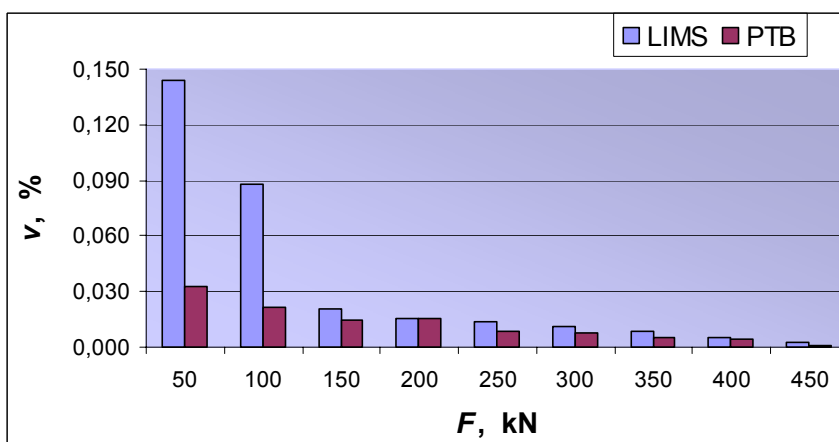
Na slikama 31, 32, 33 i 34 su grafički prikazani dobiveni rezultati kriterija za ocjenjivanje u ovisnosti o iznosu narinute sile etalona Z4A/500 kN umjeravanog u PTB-u i LIMS-u.



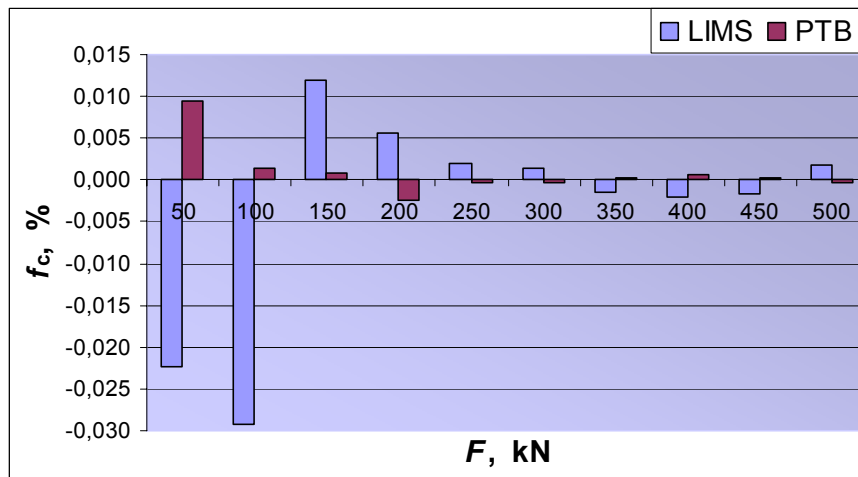
Slika 31 – Usporedni prikaz relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/500 kN



Slika 32 – Usporedni prikaz relativne pogreške obnovljivosti sa rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4A/500 kN

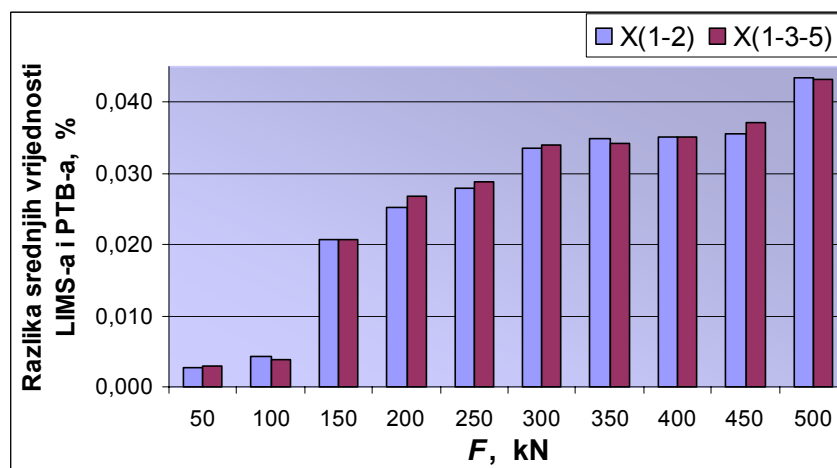


Slika 33 – Usporedni prikaz relativne pogreške histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4A/500 kN



Slika 34 – Usporedni prikaz relativne pogreške interpolacije u ovisnosti o sili za etalon Z4A/500 kN

Slika 35 prikazuje razlike srednjih vrijednosti očitavanja posredničkog etalona Z4A/500 kN između LIMS-a i PTB-a.



Slika 35 – Usporedni prikaz razlika srednjih vrijednosti očitavanja u ovisnosti o sili za etalon Z4A/500 kN

5.1.5. Procjena mjerne sposobnosti referentnog etalona sile LIMS-a

U tablicama 18, 19 i 20 date su relativne varijance srednjih vrijednosti sila $w(\Delta_D)$, relativne varijance ponovljivosti uz rotaciju $w(\Delta_R)$, relativne varijance histereze $w(\Delta_H)$, kombinirane standardne relativne nesigurnosti realizacije sile $w_{(FCM)}$, te relativne nesigurnosti realizacije sile referentnog etalona $W_{(FCM)}$, a prikazane su vrijednosti dobivene umjeravanjem svakog posredničkog etalona zasebno.

Tablica 18 – Procjenjene nesigurnosti umjeravanja referentnog etalona sile LIMS-a, dobivene posredničkim etalonom Z4A/50 kN

Z4A/50 kN					
F, kN	$w^2(\Delta_D)$, %	$w^2(\Delta_R)$, %	$w^2(\Delta_H)$, %	$w_{(FCM)}$, %	$W_{(FCM)}$, %
10	5,895E-07	3,013E-05	2,214E-07	0,007	0,014
15	8,627E-08	1,482E-05	5,829E-08	0,006	0,011
20	7,380E-08	1,909E-05	5,297E-09	0,006	0,012
25	5,380E-08	1,454E-05	3,285E-09	0,006	0,011
30	6,681E-07	1,009E-05	7,934E-07	0,005	0,010
35	1,725E-06	1,273E-05	4,386E-06	0,006	0,012
40	4,599E-06	6,757E-06	7,679E-06	0,006	0,012
45	1,823E-06	7,094E-06	4,352E-06	0,005	0,011
50	3,672E-06	5,405E-06		0,005	0,010

Tablica 19 – Procjenjene nesigurnosti umjeravanja referentnog etalona sile LIMS-a, dobivene posredničkim etalonom Z4A/100 kN

Z4A/100 kN					
F, kN	$w^2(\Delta_D)$, %	$w^2(\Delta_R)$, %	$w^2(\Delta_H)$, %	$w_{(FCM)}$, %	$W_{(FCM)}$, %
10	3,134E-06	2,703E-05	4,084E-06	0,011	0,022
20	3,543E-07	1,464E-05	2,084E-06	0,008	0,015
30	2,452E-06	4,692E-06	7,175E-05	0,010	0,020
40	1,002E-05	3,130E-06	2,609E-05	0,007	0,015
50	8,134E-06	2,904E-06	2,257E-05	0,007	0,014
60	1,462E-05	2,447E-06	3,145E-05	0,008	0,016
70	1,513E-05	1,968E-06	1,456E-04	0,013	0,026
80	1,161E-05	2,410E-06	2,219E-05	0,007	0,014
90	1,354E-05	1,648E-06	2,669E-05	0,007	0,015
100	1,424E-05	1,727E-06		0,005	0,011

Tablica 20 – Procjenjene nesigurnosti umjeravanja referentnog etalona sile LIMS-a, dobivene posredničkim etalonom Z4A/500 kN

Z4A/500 kN					
F, kN	$w^2(\Delta_D)$, %	$w^2(\Delta_R)$, %	$w^2(\Delta_H)$, %	$w_{(FCM)}$, %	$W_{(FCM)}$, %
50	8,657E-06	5,642E-07	8,242E-04	0,031	0,063
100	3,942E-06	2,704E-07	2,787E-04	0,018	0,036
150	1,295E-06	5,785E-07	1,481E-04	0,013	0,026
200	4,673E-05	1,694E-07	1,053E-04	0,013	0,027
250	3,440E-05	1,010E-07	1,030E-04	0,012	0,024
300	1,259E-04	8,067E-08	8,756E-05	0,015	0,030
350	2,475E-05	1,441E-07	7,081E-05	0,010	0,020
400	2,018E-05	2,203E-07	5,185E-05	0,009	0,018
450	1,765E-05	1,459E-07	4,895E-05	0,009	0,017
500	1,953E-05	8,852E-08		0,005	0,011

Rezultati mjerenja ostalih pokusa

Dodatna mjerenja na referentnom etalonu LIMS-a provedena su radi utvrđivanja mogućih utjecaja temperaturne promjene, te vibracija i buke na mjerne rezultate. Ovdje su dati dobiveni rezultati koji su naknadno analizirani u sljedećem poglavlju.

Za utvrđivanje mogućih utjecaja temperaturne promjene na mjerne rezultate provedena su mjerenja tokom kojih je temperatura naglo snižena kako bi se vidjelo ponašanje i odstupanje mjernih rezultata. U rezultate je uzeta ukupna srednja vrijednost očitavanja za sve provedene nizove, srednja vrijednost očitavanja za nizove pri konstantnom iznosu temperature od 24°C, srednja vrijednost očitavanja za nizove u periodu kada se temperatura mjenjala, te srednja vrijednost očitavanja za nizove kada se temperatura ustalila na 21,5°C, koji su prikazani u tablici 22, a detaljnije su obrađeni i analizirani u sljedećem poglavlju.

Tablica 21 – Srednje vrijednosti očitavanja za pojedine temperature

Sila, kN	X_{SR} , mV/V			
	24°C	Promjena temperature	21,5°C	Ukupno
15	0,600223	0,600187	0,600213	0,600215
20	0,800128	0,800080	0,800104	0,800110
30	1,199885	1,199801	1,199827	1,199846
40	1,599763	1,599793	1,599674	1,599702
50	1,999601	1,999626	1,999489	1,999528

Tablice 23 i 24 prikazuju rezultate srednjih vrijednosti očitavanja dobivenih za mjerne nizove provedene preko noći i za mjerne nizove provedene preko dana, te njihove ukupne srednje vrijednosti, koji su mjereni u svrhu analize mogućih utjecaja vibracija i buke na mjerne rezultate, gdje su i detaljno objašnjeni.

Tablica 22 – Srednje vrijednosti očitavanja mjerenja preko noći

MJERENJE PREKO NOĆI															
Sila, kN	NIZ 1 X_{SR} , mV/V	NIZ 2 X_{SR} , mV/V	NIZ 3 X_{SR} , mV/V	NIZ 4 X_{SR} , mV/V	NIZ 5 X_{SR} , mV/V	NIZ 6 X_{SR} , mV/V	NIZ 7 X_{SR} , mV/V	NIZ 8 X_{SR} , mV/V	NIZ 9 X_{SR} , mV/V	NIZ 10 X_{SR} , mV/V	NIZ 11 X_{SR} , mV/V	NIZ 12 X_{SR} , mV/V	NIZ 13 X_{SR} , mV/V	NIZ 14 X_{SR} , mV/V	UKUPNO $X_{SR}(NOĆ)$, mV/V
10	0,199974	0,199950	0,199980	0,199944	0,199969	0,199969	0,199972	0,199941	0,199970	0,199943	0,199974	0,199974	0,199951	0,199962	0,199963
20	0,399918	0,399878	0,399903	0,399889	0,399898	0,399905	0,399909	0,399878	0,399905	0,399881	0,399902	0,399904	0,399884	0,399901	0,399897
30	0,599826	0,599813	0,599837	0,599812	0,599817	0,599828	0,599834	0,599801	0,599826	0,599805	0,599839	0,599821	0,599816	0,599833	0,599822
40	0,799700	0,799677	0,799712	0,799681	0,799706	0,799699	0,799720	0,799684	0,799697	0,799682	0,799731	0,799697	0,799692	0,799705	0,799699
50	0,999619	0,999586	0,999643	0,999619	0,999628	0,999615	0,999636	0,999626	0,999625	0,999608	0,999645	0,999630	0,999628	0,999636	0,999625
60	1,199552	1,199534	1,199571	1,199534	1,199565	1,199546	1,199563	1,199552	1,199550	1,199547	1,199587	1,199561	1,199549	1,199574	1,199556
70	1,399447	1,399411	1,399476	1,399429	1,399462	1,399445	1,399455	1,399453	1,399448	1,399442	1,399494	1,399459	1,399453	1,399484	1,399454
80	1,599362	1,599335	1,599396	1,599327	1,599377	1,599356	1,599358	1,599375	1,599364	1,599341	1,599405	1,599361	1,599345	1,599412	1,599366
90	1,799305	1,799279	1,799358	1,799274	1,799323	1,799293	1,799305	1,799318	1,799311	1,799284	1,799371	1,799307	1,799292	1,799356	1,799313
100	1,999245	1,999217	1,999296	1,999222	1,999273	1,999240	1,999248	1,999286	1,999251	1,999225	1,999321	1,999264	1,999249	1,999318	1,999261

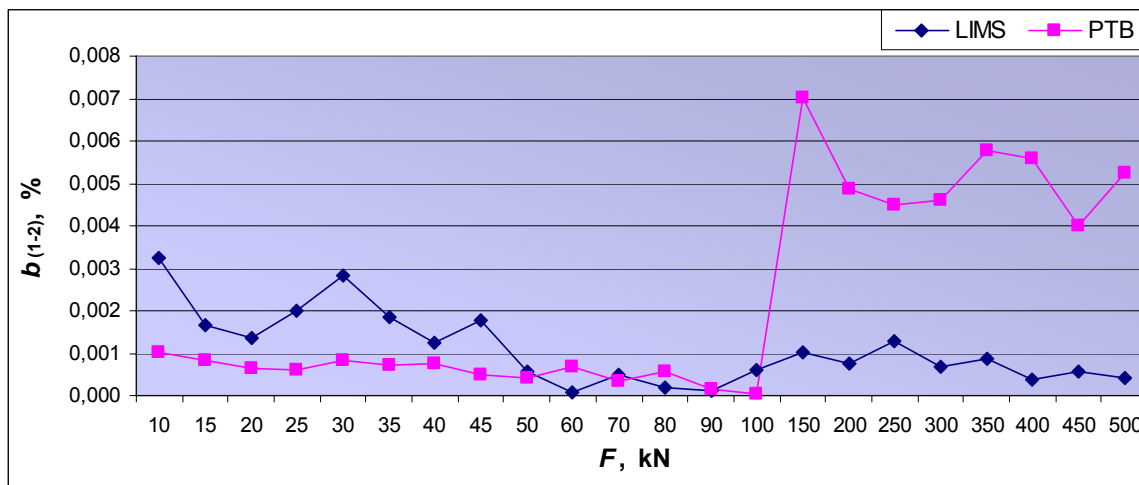
Tablica 23 – Srednje vrijednosti očitavanja mjerenja preko dana

MJERENJE PREKO DANA															
Sila, kN	NIZ 1 X_{SR} , mV/V	NIZ 2 X_{SR} , mV/V	NIZ 3 X_{SR} , mV/V	NIZ 4 X_{SR} , mV/V	NIZ 5 X_{SR} , mV/V	NIZ 6 X_{SR} , mV/V	NIZ 7 X_{SR} , mV/V	NIZ 8 X_{SR} , mV/V	NIZ 9 X_{SR} , mV/V	NIZ 10 X_{SR} , mV/V	NIZ 11 X_{SR} , mV/V	NIZ 12 X_{SR} , mV/V	NIZ 13 X_{SR} , mV/V	NIZ 14 X_{SR} , mV/V	UKUPNO $X_{SR}(DAN)$, mV/V
10	0,199959	0,199937	0,199967	0,199951	0,199965	0,199961	0,199938	0,199967	0,199963	0,199951	0,199960	0,199966	0,199964	0,199962	0,199958
20	0,399877	0,399871	0,399898	0,399891	0,399892	0,399881	0,399864	0,399901	0,399893	0,399883	0,399894	0,399894	0,399886	0,399894	0,399887
30	0,599799	0,599803	0,599812	0,599811	0,599742	0,599826	0,599801	0,599832	0,599840	0,599826	0,599820	0,599824	0,599821	0,599836	0,599814
40	0,799671	0,799669	0,799671	0,799661	0,799685	0,799687	0,799659	0,799693	0,799689	0,799686	0,799685	0,799702	0,799692	0,799700	0,799682
50	0,999587	0,999573	0,999588	0,999580	0,999604	0,999591	0,999579	0,999616	0,999615	0,999609	0,999604	0,999607	0,999607	0,999610	0,999598
60	1,199502	1,199497	1,199528	1,199505	1,199529	1,199517	1,199518	1,199541	1,199543	1,199548	1,199539	1,199532	1,199543	1,199549	1,199528
70	1,399392	1,399379	1,399411	1,399402	1,399421	1,399412	1,399397	1,399442	1,399431	1,399442	1,399426	1,399433	1,399431	1,399436	1,399418
80	1,599291	1,599288	1,599315	1,599306	1,599321	1,599319	1,599307	1,599344	1,599351	1,599346	1,599333	1,599336	1,599328	1,599355	1,599325
90	1,799226	1,799225	1,799263	1,799239	1,799271	1,799256	1,799258	1,799297	1,799290	1,799291	1,799274	1,799283	1,799270	1,799288	1,799267
100	1,999149	1,999161	1,999200	1,999173	1,999211	1,999195	1,999198	1,999220	1,999227	1,999225	1,999201	1,999217	1,999224	1,999233	1,999202

5.2. Analiza rezultata umjeravanja

U daljnjim razmatranjima analizirani su rezultati umjeravanja sva tri posrednička etalona sile u PTB-u i LIMS-u i prikazani su njihovi kriteriji za klasifikaciju tako da je obuhvaćeno cijelo mjerno područje referentnog etalona sile LIMS-a od 10 kN do 500 kN, kao i razlike srednjih vrijednosti umjeravanja posredničkih etalona u PTB-u i LIMS-u.

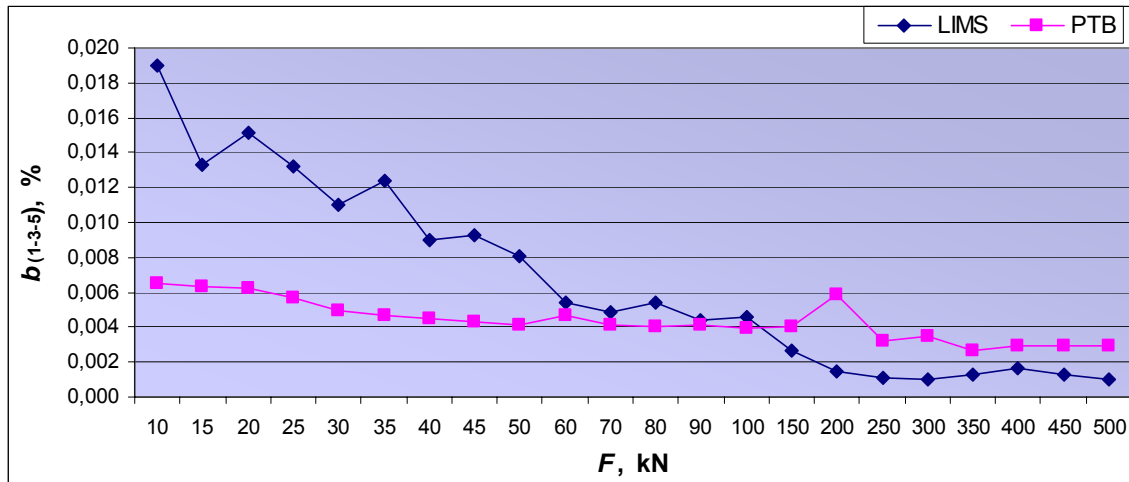
Slika 36 prikazuje relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije $b_{(1-2)}$ za sva tri posrednička etalona umjeravana u PTB-u i LIMS-u za pojedine korake sile u čitavom mjernom području referentnog etalona LIMS-a od 10 kN do 500 kN.



Slika 36 – Usporedni prikaz relativne pogreške ponovljivosti bez rotacije između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN

Vidljivo je kako je relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije pri manjim iznosima sile nešto veća kod referentnog etalona LIMS-a, dok je kod većih iznosa sile izraženija kod nacionalnog etalona PTB-a.

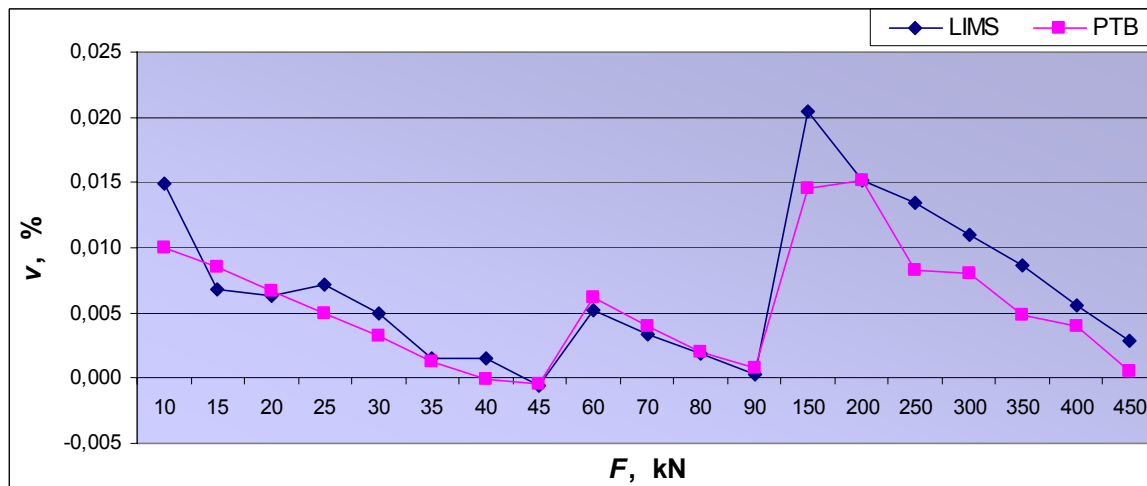
Slika 37 prikazuje relativne pogreške obnovljivosti sa rotacijom $b_{(1-3-5)}$, za sva tri posrednička etalona umjeravana u PTB-u i LIMS-u za pojedine korake sile u čitavom mjernom području referentnog etalona LIMS-a od 10 kN do 500 kN.



Slika 37 – Usporedni prikaz relativne pogreške obnovljivosti sa rotacijom između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN

Može se vidjeti kako se relativna pogreška obnovljivosti sa rotacijom uglavnom smanjuje sa porastom sile, te da je izraženija kod referentnog etalona LIMS-a u mjernom području do 100 kN, dok je u mjernom području od 100 kN do 500 kN ona nešto izraženija kod nacionalnog etalona PTB-a.

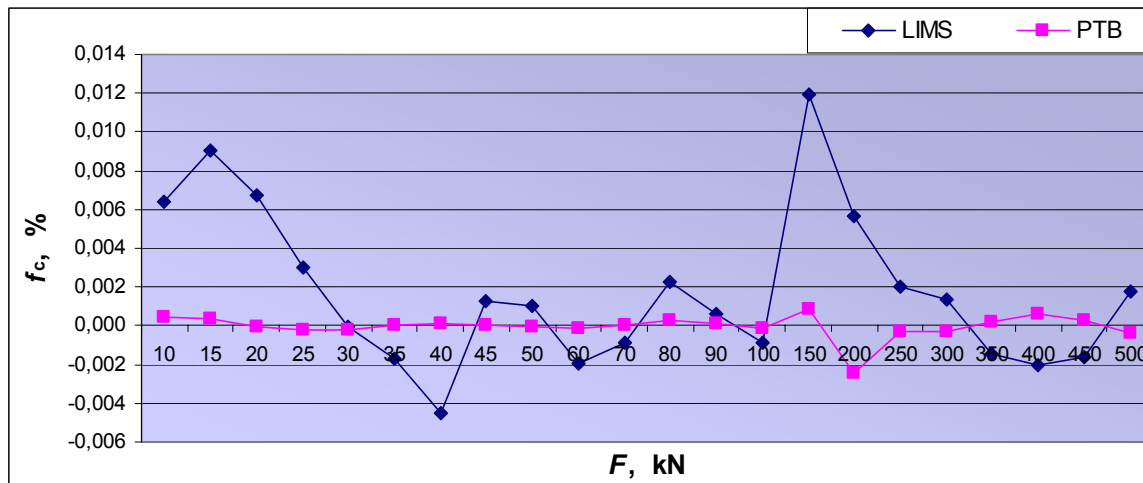
Slika 38 prikazuje relativne pogreške histereze v , za sva tri posrednička etalona umjeravana u PTB-u i LIMS-u za pojedine korake sile u čitavom mjernom području referentnog etalona LIMS-a od 10 kN do 500 kN.



Slika 38 – Usporedni prikaz relativne pogreške histereze između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN

Iz slike je vidljivo kako relativna pogreška histereze v opada sa porastom sile te da je uglavnom nešto izraženija kod referentnog etalona LIMS-a. Također se može vidjeti kako se čitavo mjerno područje ovdje jasno razdjeljuje na tri područja i to za mjerno područje svakog od tri umjeravana etalona, što se na dijagramu može primjetiti kao dva značajna porasta na točkama 60 kN i 150 kN.

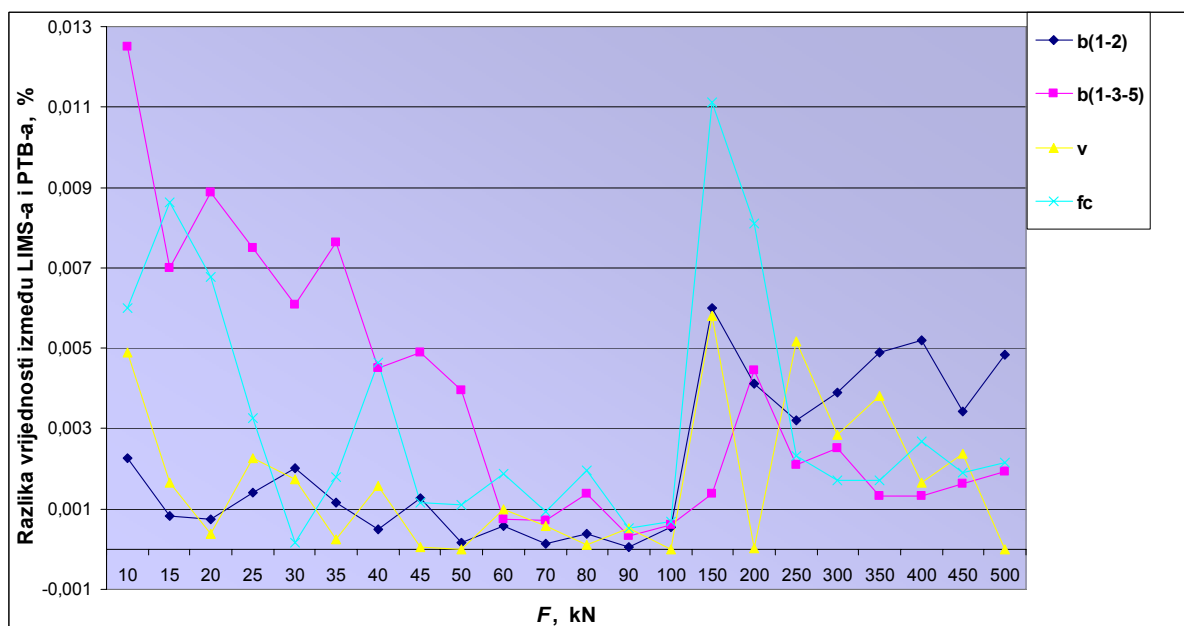
Slika 39 prikazuje relativne pogreške interpolacije f_c , za sva tri posrednička etalona umjeravana u PTB-u i LIMS-u za pojedine korake sile u čitavom mjernom području referentnog etalona LIMS-a od 10 kN do 500 kN.



Slika 39 – Usporedni prikaz relativne pogreške interpolacije između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN

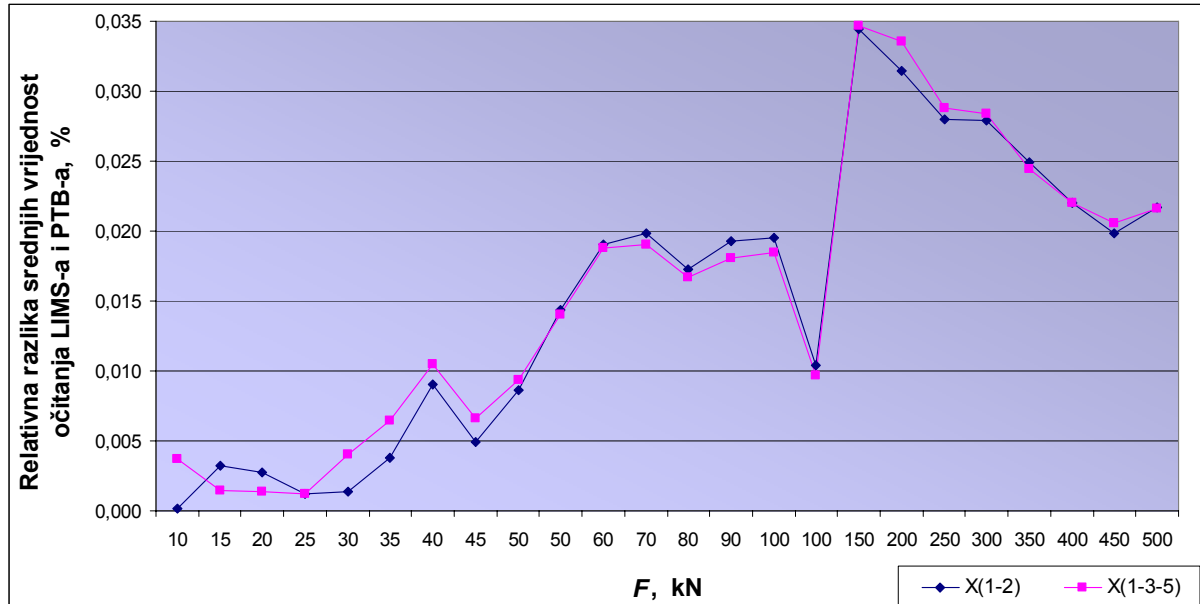
Ovdje je vidljivo kako relativna pogreška interpolacije kod referentnog etalona LIMS-a poprilično varira i nema neki izraženi trend ponašanja, dok je kod nacionalnog etalona PTB-a ona vrlo mala te uglavnom jednaka.

Slika 40 prikazuje razlike kriterija za klasifikaciju posredničkih etalona, relativne polgreške ponovljivosti bez rotacije $b_{(1-2)}$, relativne pogreške obnovljivosti s rotacijom $b_{(1-3-5)}$, relativne pogreške histerize v i relativnog interpolacijskog odstupanja f_c između nacionalnog etalona PTB-a i referentnog etalona LIMS-a.



Slika 40 – Zajednički prikaz razlika relativnih pogrešaka između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN

Slika 41 prikazuje relativne razlike srednjih vrijednosti očitavanja u istom položaju $X_{(1-2)}$ i srednjih vrijednosti očitavanja u rotirajućim položajima $X_{(1-3-5)}$ posredničkih etalona umjeravanih u PTB-u i LIMS-u za pojedine korake sile u čitavom mjernom području referentnog etalona LIMS-a od 10 kN do 500 kN.



Slika 41 – Usporedni prikaz relativnih razlika srednjih vrijednosti očitavanja bez i sa rotacijom između PTB-a i LIMS-a za čitavo mjesto područje od 10 kN do 500 kN

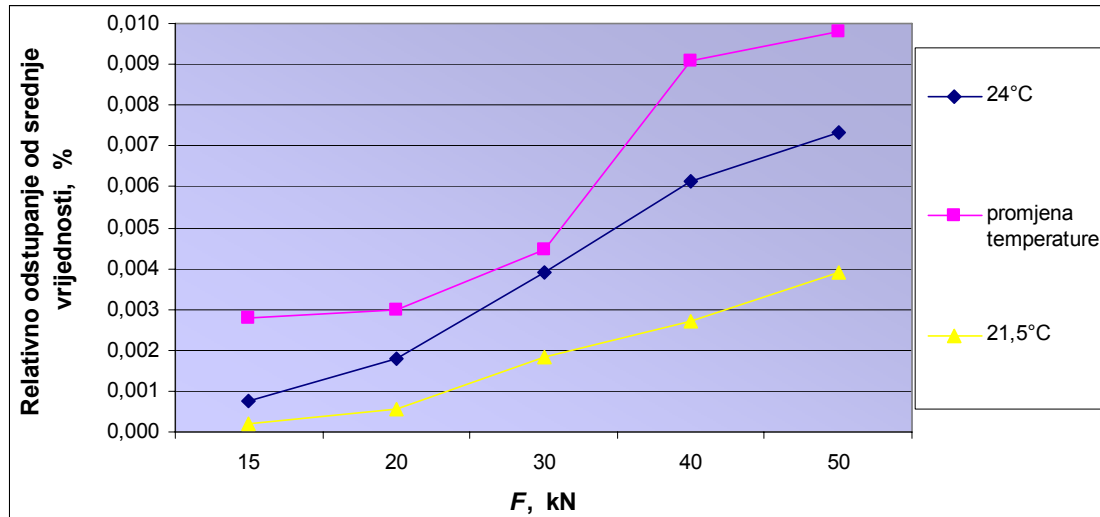
Može se vidjeti da kao relativne razlike srednjih vrijednosti očitavanja u istom položaju i rotirajućim položajima posredničkih etalona imaju sličan trend ponašanja, te uglavnom rastu pri nižim vrijednostima sile, do 100 kN, dok nakon toga uglavnom opadaju. Značajan skok koji se može primjetiti sa vrijednosti sile od 100 kN na 150 kN može se obrazložiti komparatornim mjernim sustavom referentnog etalona LIMS-a, koji ima dvostruko složene dinamometre nazivnih sila 100 kN i 500 kN, te upravo prijelazom sa jednog dinamometra na drugi.

Utjecaj temperature na rezultate umjeravanja

Kako bi utvrdili utjecaj temperature na rezultate umjeravanja provedena su mjerenja na posredničkom etalonu **Z4A/50 kN** u tu svrhu. Mjerni nizovi etalona sadrže po pet mjernih točaka na silama 15, 20, 30, 40 i 50 kN sa histereznim mjerenjem na istim koracima sile. Očitavanja su izražena kao promjena napona na pojačalu u mV/V. Mjerenja su počela pri temperaturi od 24°C, nakon čega je temperatura smanjena na 21,5°C. U rezultate je uzeta ukupna srednja vrijednost očitavanja za sve provedene nizove, srednja vrijednost očitavanja za nizove pri konstantnom iznosu temperature od 24°C, srednja vrijednost očitavanja za nizove u

periodu kada se temperatura mjenjala, te srednja vrijednost očitavanja za nizove kada se temperatura ustalila na 21,5°C. Rezultati su prikazani u tablici 21.

Slika 42 prikazuje odstupanja srednjih vrijednosti očitavanja na pojedinim temperaturama od ukupne srednje vrijednosti očitavanja za cijeli raspon mjerenja.



Slika 42 – Utjecaj temperature na odstupanje od srednje vrijednosti mjernog rezultata

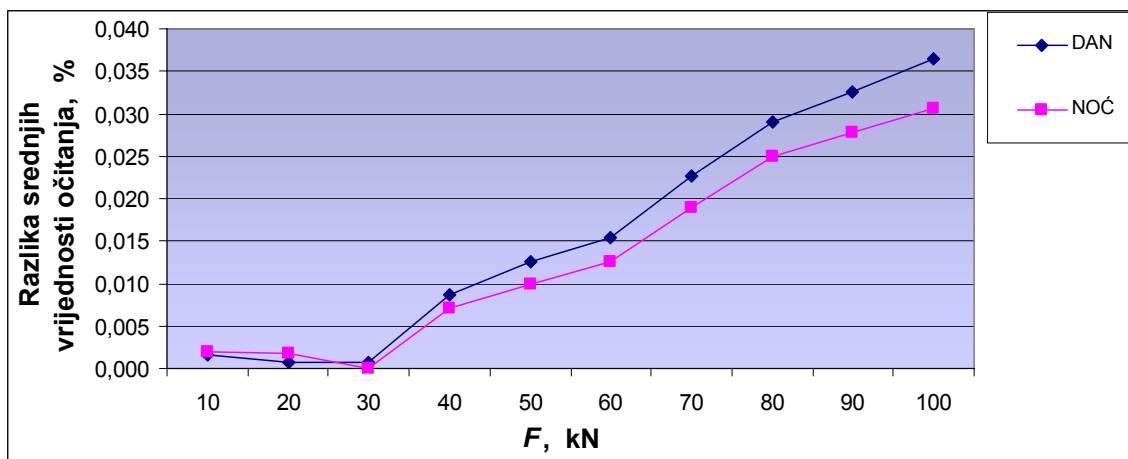
Iz dijagrama je vidljivo kako se rezultati ponašaju slično kao i rezultati dobiveni kod umjeravanja prema normi EN ISO 376, odnosno da prema višim iznosima sile rastu i odstupanja od srednjih vrijednosti, te da su kod nižih temperatura niža i odstupanja od ukupne srednje vrijednosti. U periodu u kojem se temperatura mijenjala vidljivo je da rezultati imaju najveća odstupanja od ukupne srednje vrijednosti, što pokazuje kako nagle, iako vrlo male, promjene temperature, doprinose netočnosti mjernih rezultata te povećavaju nesigurnost umjeravanja, pa sukladno tome pri umjeravanju je značajno održavanje konstantne temperature radi što točnijih rezultata umjeravanja. Prema normi EN ISO 376 umjeravanje treba provoditi u temperaturnom području od 18°C do 28°C, s time da promjena temperature za vrijeme umjeravanja bude unutar $\pm 1^\circ\text{C}$.

Utjecaj vibracija na rezultate umjeravanja

U ovdje provedenom pokusu, mjerenja su provedena na referentnom etalonu LIMS-a preko dana, te preko noći radi utvrđivanja mogućih utjecaja vibracija i buke na mjerne rezultate, a provedena su na posredničkom etalonu **Z4A/100 kN**. Važno je napomenuti da se referentni etalon LIMS-a nalazi u blizini ceste. Provedena mjerenja sastoje se od 14 mjernih nizova sa histereznim mjerenjem, a korak sile iznosio je 10% nazivne sile. U rezultate je uzeta ukupna srednja vrijednost očitavanja za nizove mjerene preko dana, te ukupna srednja vrijednost za nizove mjerene preko noći. Rezultati su prikazani u tablicama 22 i 23. Ti

rezultati uspoređeni su sa ukupnom srednjom vrijednosti svih očitavanja istog etalona pri umjeravanju u nacionalnom etalonu PTB-a, te su uspoređeni međusobno, prikazani kao razlika srednjih vrijednosti očitavanja između dva provedena mjerenja.

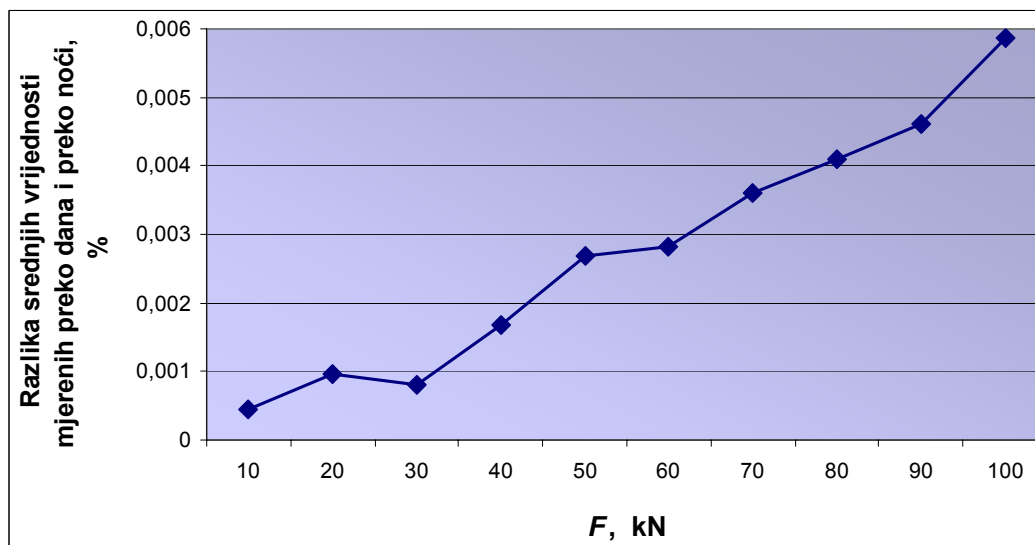
Slika 43 prikazuje razliku srednjih vrijednosti očitavanja dobivenih mjerenjem preko dana i preko noći i ukupne srednje vrijednosti rezultata dobivenih umjeravanjem posredničkog etalona u nacionalnom etalonu PTB-a.



Slika 43 – Odstupanje srednjih vrijednosti očitavanja od srednje vrijednosti PTB-a

Vidi se da srednje vrijednosti dobivene mjerenjem preko dana imaju veće odstupanje od vrijednosti dobivenih mjerenjem u nacionalnom etalonu PTB-a nego oni dobiveni mjerenjem preko noći, što ukazuje na to da blizina referentnog etalona prometnom području, iako je isti smješten na antivibracijskim temeljima, ipak utječe na dobivene mjerne rezultate.

Slika 44 prikazuje razliku srednjih vrijednosti dobivenih mjerenjem preko dana i preko noći.



Slika 44 – Razlika srednjih vrijednosti očitavanja mjerenih preko dana i preko noći

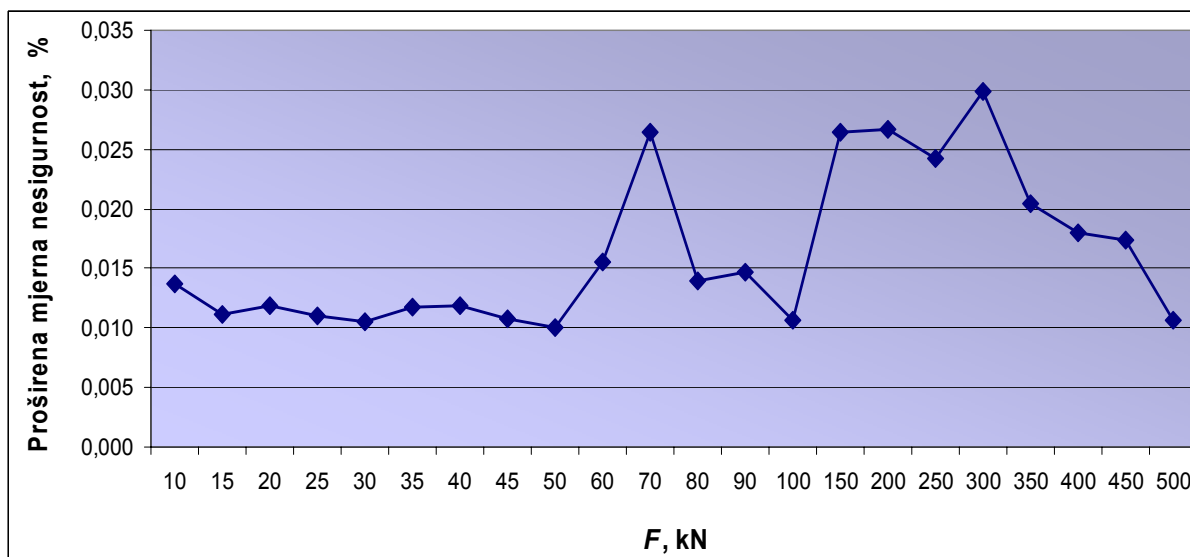
Mjerna sposobnost referentnog etalona sile LIMS-a

Tablica 21 prikazuje procijenjene mjerne sposobnosti referentnog etalona sile LIMS-a u njegovom cijelom mjernom području od 10 kN do 500 kN, dobivene umjeravanjem posredničkih etalona sile u referentnom etalonu LIMS-a.

Tablica 24 - Proširene mjerne nesigurnosti referentnog etalona sile LIMS-a, dobivene umjeravanjem posredničkih etalona

F, kN	Z4A/50 kN	Z4A/100 kN	Z4A/500 kN	Max. vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti, %
10	0,014	0,022		0,022
15	0,011			0,011
20	0,012	0,015		0,015
25	0,011			0,011
30	0,010	0,020		0,020
35	0,012			0,012
40	0,012	0,015		0,015
45	0,011			0,011
50	0,010	0,014	0,063	0,063
60		0,016		0,016
70		0,026		0,026
80		0,014		0,014
90		0,015		0,015
100		0,011	0,036	0,036
150			0,026	0,026
200			0,027	0,027
250			0,024	0,024
300			0,030	0,030
350			0,020	0,020
400			0,018	0,018
450			0,017	0,017
500			0,011	0,011

Slika 45 prikazuje proširene mjerne nesigurnosti referentnog etalona sile LIMS-a na njegovom čitavom mjernom području od 10 kN do 500 kN, pri čemu su vrijednosti mjerne nesigurnosti prikazane u dijagramu za pojedinu vrijednost sile, one dobivene umjeravanjem posredničkog etalona niže nazivne sile.



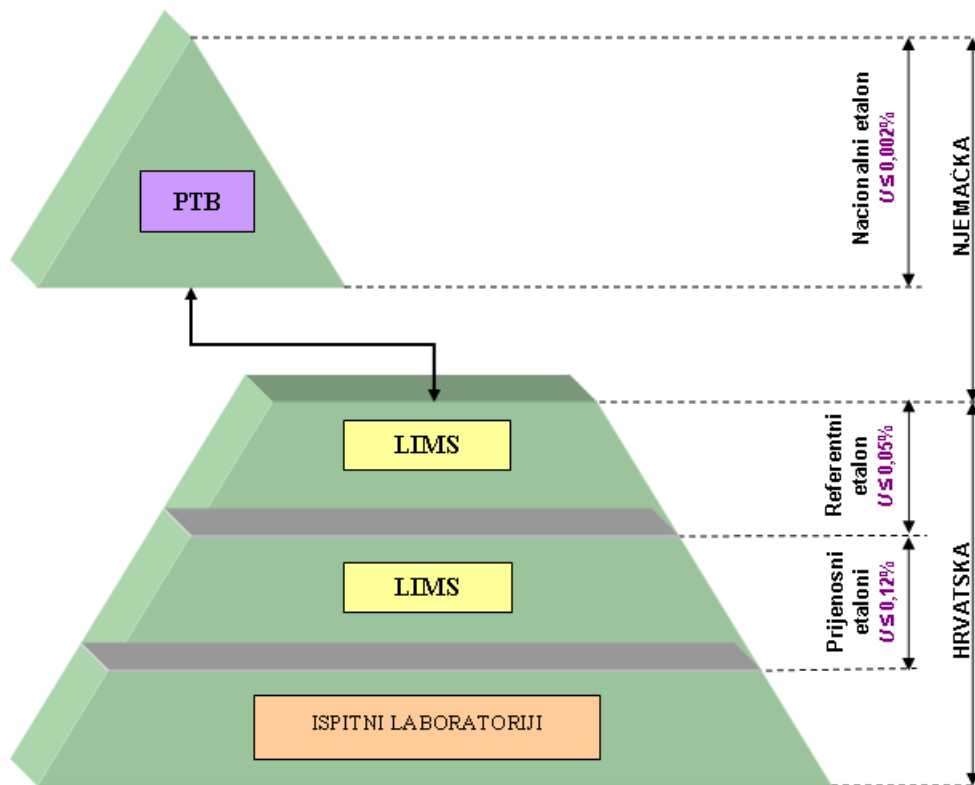
Slika 45 – Prikaz proširene mjerne nesigurnosti referentnog etalona sile LIMS-a za čitavo mjerno područje od 10 kN do 500 kN

Vidljivo je kako je mjerna nesigurnost u području do 50 kN uglavnom podjednaka te vrlo mala, nakon čega nema neki određen trend ponašanja. Maksimalna vrijednost proširene mjerne nesigurnosti iznosi 0,026 %. Ta je vrijednost, kao i vrijednosti za čitavo mjerno područje, manja od 0,05 %, kolika je pretpostavljena mjerna sposobnost referentnog etalona sile LIMS-a.

6. ZAKLJUČAK

Iz dobivenih rezultata umjeravanja referentnog etalona sile LIMS-a, te nakon njihove obrade i provedene analize rezultata, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Pretpostavljena mjerna sposobnost referentnog etalona sile LIMS-a iznosi $<0,05\%$. Najveća procijenjena i izračunata vrijednost proširene mjerne nesigurnosti referentnog etalona LIMS-a, dobivena umjeravanjem posredničkih etalona sile za čitavo mjerno područje referentnog etalona od 10 kN do 500 kN iznosi **0,026 %**, što pokazuje kako je mjerna sposobnost referentnog etalona sile LIMS-a u granicama pretpostavljene. U cijelom mjernom području referentnog etalona dobivena je nesigurnost manja od $0,05\%$, što ukazuje kako je sukladno normi EN ISO 376 dostatan za umjeravanje prijenosnih etalona klase 1. Stoga se sljedivost za mjernu veličinu sile može prikazati sljedećom piramidom (slika 46).



Slika 46 – Lanac mjerne sljedivosti za Hrvatsku sa referentnim etalom sile LIMS-a [9]

- Iz analiziranih rezultata dobivenih mjerenjima na posredničkim etalonima u različitim okolišnim uvjetima, uz promjenu temperature ili mjerenja preko dana i preko noći, vidljivo je kako promjena temperature pri umjeravanju, kao i vibracije (blizina

prometnice), znatno utječu na rezultate umjeravanja, te na mjernu nesigurnost, a time i na samu mjernu sposobnost referentnog etalona sile.

- Kvaliteta posredničkih etalona sile značajno utječe na mjernu sposobnost referentnog etalona sile. Korištenjem posredničkih etalona više kvalitete mjerne nesigurnosti mogu se dodatno smanjiti, čime bi se dodatno poboljšala i mjerna sposobnost referentnog etalona sile.

LITERATURA

- [1] Guide to the Measurement of Force, The Institute of Measurement and Control, 1998.
- [2] Alar Ž.: Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera, doktorska disertacija, Zagreb, 2008.
- [3] Mahović S.: Teorija i tehnika mjerenja, podloge za predavanja, FSB, 2006.
- [4] WELMEC - Europska suradnja u zakonskom mjeriteljstvu, definicije naziva
- [5] EAL-R2 – Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, European co-operation for Accreditation, 1997.
- [6] EA- 4/07 – Sljedivost mjerne i ispitne opreme prema nacionalnim etalonima, Europska suradnja na akreditaciji, Državni zavod za mjeriteljstvo, Zagreb, 2008.
- [7] www.dz.hr/download/repository/REFMAT.pdf
- [8] Alar Ž.: Procjenjivanje nesigurnosti rezultata mjerenja sile, magistarski rad, Zagreb, 2001.
- [9] www.dzm.hr/znanstveno_mjeriteljstvo/nacionalni_umjerni_laboratoriji/sila/sljedivost_lims-a
- [10] JCGM 200:2008, Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM), Državni zavod za mjeriteljstvo
- [11] www.ptb.de
- [12] EURAMET Calibration Guide EM/cg/04.01/p – Uncertainty of Force Measurements, April 2009
- [13] EAL-G22 - Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements, European co-operation for Accreditation, 1996
- [14] www.gtm-gmbh.com
- [15] http://www.fsb.hr/zavod_za_materijale/index.php?menu=20&action=1
- [16] Alar Ž., Franz M., Aleksandrov T.: Mjerna sposobnost referentnog etalona sile instaliranog u LIMS-u, Matrib '06
- [17] www.hbm.com
- [18] ISO 376: Metallic materials – Calibration of force – proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines, 2004.